

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Институт Наук о Земле
Кафедра региональной геологии

Лебедев Иван Евгеньевич

**Тектонофизические критерии прогноза оруденения
глубоких горизонтов зоны минерализации «Надвиговая»
(Бадранское рудное поле, Республика Саха (Якутия))**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:
доцент кафедры региональной геологии
к. г.-м. н. В. Н. Войтенко

«__»____2017

Заведующий кафедрой:
Д.г.-м.н., проф А. К. Худолей

«__»____2017

Санкт-Петербург
2017

Содержание

Введение	3
Глава 1. Геологическое строение Бадранского рудного узла	4
1.1. Стратиграфия	5
1.2. Магматизм	8
1.3. Метаморфизм	8
1.4. Тектоника	8
1.5. Полезные ископаемые	10
1.6. Бадранское рудное поле	11
Глава 2. Геологическое строение Бадранского рудного поля по данным СПбГУ	13
Глава 3. Методика расчёта тектонофизических параметров	19
3.1 Построение трехмерной модели	19
3.2 Расчет ориентировки и величины региональных (внешних) напряжений	21
3.2.1. Ориентировка	21
3.2.2. Величины региональных напряжений	24
3.3. Расчет напряженных параметров для каждой из площадок зоны «Надвиговая»	26
Глава 4. Результаты расчетов тектонофизических параметров	26
4.1. Взброс	27
4.1.1. Кровля	27
4.1.2. Подошва	30
4.2 Сброс	33
4.2.1. Кровля	33
4.2.2. Подошва	36
4.3 Интерпретация результатов	38
Выводы	40
Литература	41

Введение

Бадранское рудное поле, как и другие месторождения Верхне-Индибирского района были сформированы в течение нескольких тектонических этапов [Фридовский, 1999; Амузинский, Агеенко, Анисимова и др., 2002; Войтенко, Задорожный, 2015; Войтенко, 2016; Васильев, Мострюков, Петров, 2016]. Традиционно выделяют дорудный, рудный (синрудный) и пострудный этапы. На многих месторождениях с жильно-прожилковыми телами на синрудном этапе наблюдается повторная активизации ранее возникших разрывных нарушений с заполнением трещинного пространства рудной минерализаций [Войтенко, Задорожный, 2015]. Неравномерное пространственное распределение жильно-прожилковых тел в зоне главного Бадранского рудоконтролирующего разрывного нарушения [Неустроев, 2002], позволяют предположить, что формирование золотоносных жильно-прожилковых тел происходило в уже сформированном разрывном нарушении со сложной формой поверхности. Поэтому целью работы явилась проверка этого предположения и прогноз расположения участков с максимальным расширением стенок разрывного нарушения, соответствующих расположению кварцево-жильных тел на глубокие горизонты по результатам расчетов параметров напряжений на поверхности разрывного нарушения.

В задачи работы входило:

1. Составить литолого-структурный план Бадранского рудного поля, разрезов и литостратиграфической колонки к нему;
2. Выявить литологическую или структурную приуроченность золотого оруденения;
3. Сделать обзор тектонофизических методов расчета напряжений;
4. Построить объёмную модель зоны Надвиговой (кровли и подошвы);
5. Провести расчёты тектонофизических параметров для поверхностей зоны «Надвиговая» с учетом литостатического давления, прочностных параметров, ориентировки и величины регионального напряжения (внешней нагрузки).
6. Сравнить пространственное распределение участков с высокими значениями относительного расширяющего давления (на момент рудообразования) и кварцевых жил по поверхностям зоны «Надвиговая».
7. Дать прогноз полезной минерализации на более глубокие горизонты.

Глава 1. Геологическое строение Бадранского рудного узла

Бадранское рудный узел находится в Оймяконском улусе Республики Саха (Якутия) в приустьевой части р. Большой Селерикан левого притока р. Индигирки. Объект находится в пределах 200000 тысячного листа Q-54-XXXIV.

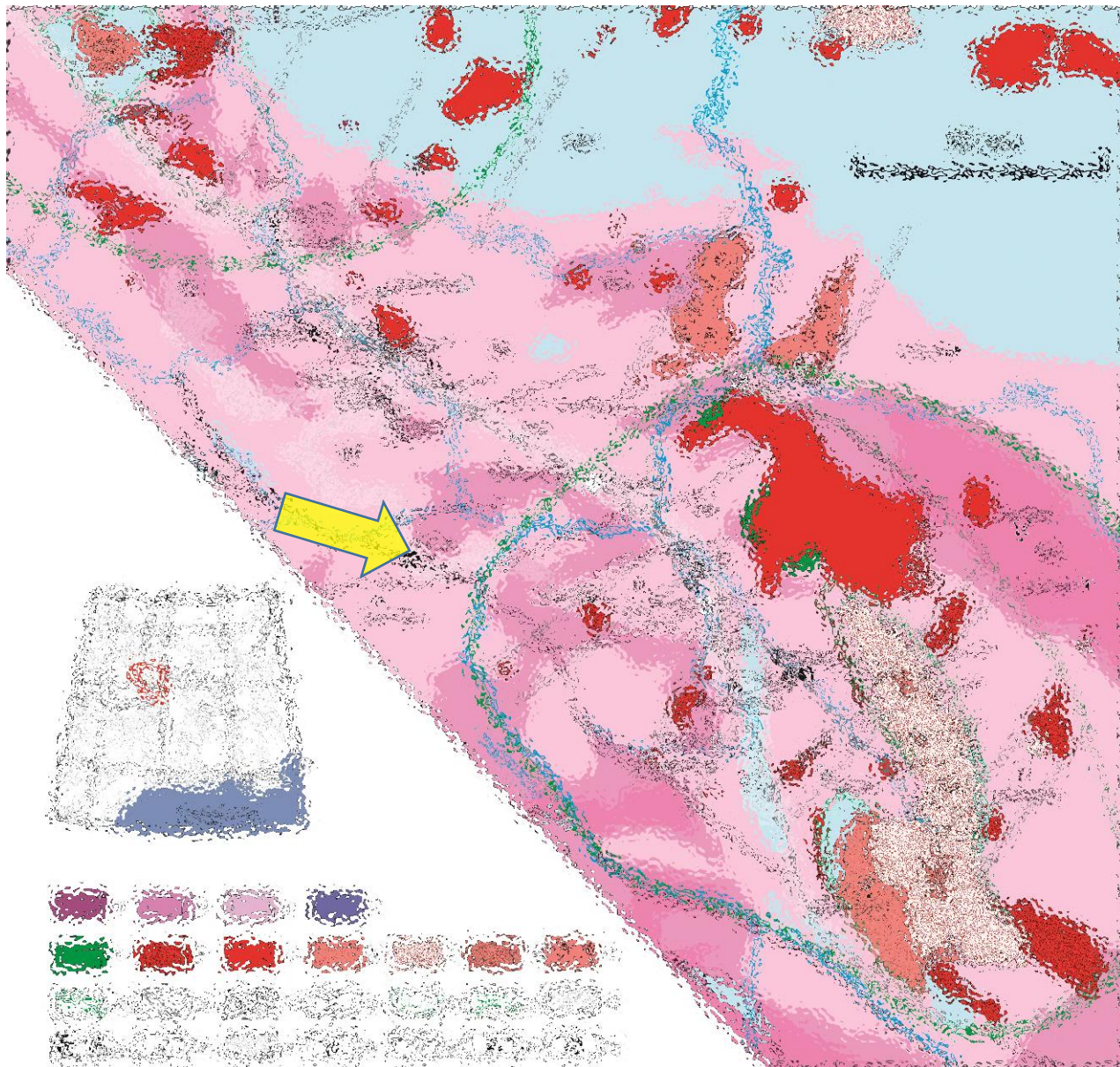


Рис. 1 Положение рудных месторождений на схеме геологического строения Верхне-Индигирского района. Геологическая основа по [Данилогорский, 1970]; [Тектоника и геодинамика..., 2001]; [Бахарев и др., 1997], с дополнениями [Акимов, 2004], [Имамединов и др., 2011].

1.1. Стратиграфия

В геологическом строении принимают участие норийские терригенные образования верхнего триаса и четвертичные отложения.

По данным предшественников [Тютрин, 2002ф, Ахъяев, 1975ф] отложения расчленяются на нижний, средний и верхний подъярусы. В составе которых выделяются четыре свиты: сюрампинская, быйттахская, черняйская и былиньинская. Общая мощность норийских пород более 4-х км. В основании и верхней части разреза преобладают алевролиты, тогда как в средней - песчаники.

Нижний подъярус

Сюрампинская свита (T_3sr) представлена довольно монотонной толщей алевролитов, песчанистых алевролитов с переходами в алевропесчаники с комковатой, линзовидно-комковатой текстурами. Присутствуют маломощные прослои серых полимиктовых песчаников. Мощность свиты не полная – более 700 метров.

Средний подъярус

Быйттахская свита (T_3bt) подразделяется на три подсвиты: нижнюю, среднюю и верхнюю.

Нижняя (T_3bt_1) согласно залегает на отложениях сюрампинской свиты. Представлена серыми, зеленовато-серыми полимиктовыми, реже кварц-полевошпатовыми, преимущественно мелкозернистыми песчаниками с маломощными прослоями темно-серых алевролитов. Отмечаются линзовидные прослои известковых разностей и конгломератов. Мощность подсвиты 220-280 м.

Средняя подсвита (T_3bt_2) представлена неравномерным чередованием пластов серых, зеленовато-серых неяснослоистых, массивных, преимущественно мелкозернистых песчаников, мощностью 30-80 м с темно-серыми, черными алевролитами, песчанистыми алевролитами тонкослоистыми, комковатыми мощностью первые метры. Общая мощность свиты колеблется от 390 до 720 м.

Верхняя подсвита (T_3bt_3) представлена пластами серых, зеленовато-серых, мелко и среднезернистых песчаников, разделенных пакетами переслаивания песчаников, алевролитов, алевропесчаников с ритмом 2-6 м. Мощность варьируется от 600 до 780 м.

Следующая черняйская свита (T_3cr) также подразделяется на нижнюю, среднюю и верхнюю. Нижняя подсвита включена в средний подъярус, тогда как остальная часть свиты относится к верхнему.

Нижняя подсвита (T_3cr_1) согласно залегает на отложениях быйттахской свиты. Представлена полимиктовыми, реже кварц-полевошпатовыми, серыми, светло-серыми, зеленовато-серыми, средне-мелкозернистыми песчаниками. В основании разреза

наблюдаются линзы конгломератов и известковых песчаников, а в центре разреза присутствуют маломощные прослои песчанистых алевролитов и алевролитов. Мощность подсвиты варьирует от 280 до 500 м.

Верхний подъярус

Средняя черняйская подсвита (T_{3cr2}) представлена ритмичным переслаиванием пластов алевролитов и песчаников, при преобладании последних. Песчаники представлены серыми, зеленовато-серыми, мелко-среднезернистыми полимиктовыми, реже светло-серыми кварц-полевошпатовыми разностями. Мощность пластов алевролитов 20-30 м, а песчаников 20-70 м. В верхних частях разреза преобладание песчаников увеличивается, появляются линзы конгломератов и известковистых песчаников. Мощность подсвиты достигает 500 м.

Верхняя подсвита (T_{3cr3}) представлена неравномерным переслаиванием пластов серых мелко-среднезернистых, преимущественно массивных песчаников и песчанистых алевролитов, алевропесчаников. Процентное соотношение песчанистых и алевролитовых пород примерно одинаково. Общая мощность подсвиты составляет 500-570 м.

Былыньинская свита (T_{3bl}) нерасчленена и согласно залегает на отложениях черняйской свиты. Свита представлена довольно монотонной толщей неравномерного переслаивания пластов черных массивных песчаников, слабо песчанистых алевролитов и комковатых, тонкослоистых темно-серых алевропесчаников. По разрезу встречаются прослои серых, темно-серых, мелкозернистых песчаников, марказитовые и кремнисто-глинистые конкреции. Не полная мощность свиты оценивается более 800 м.

Четвертичная система

Представлена аллювиальными, пролювиальными отложениями позднечетвертичного и современного возраста. Верхне-современные звенья (Q_{III-IV}) представлены погребенными рыхлыми отложениями (аллювиальными, делювиально-солифлюкционными, пролювиальными) скрытыми под долинами больших рек: Большого Селерикана, Индигирки и др.. [Ахъяев, 1975ф] Современное звено (Q_{IV}) в пределах рудного узла представлено в основном аллювиальными отложениями по составу не отличающихся от размываемых пород.

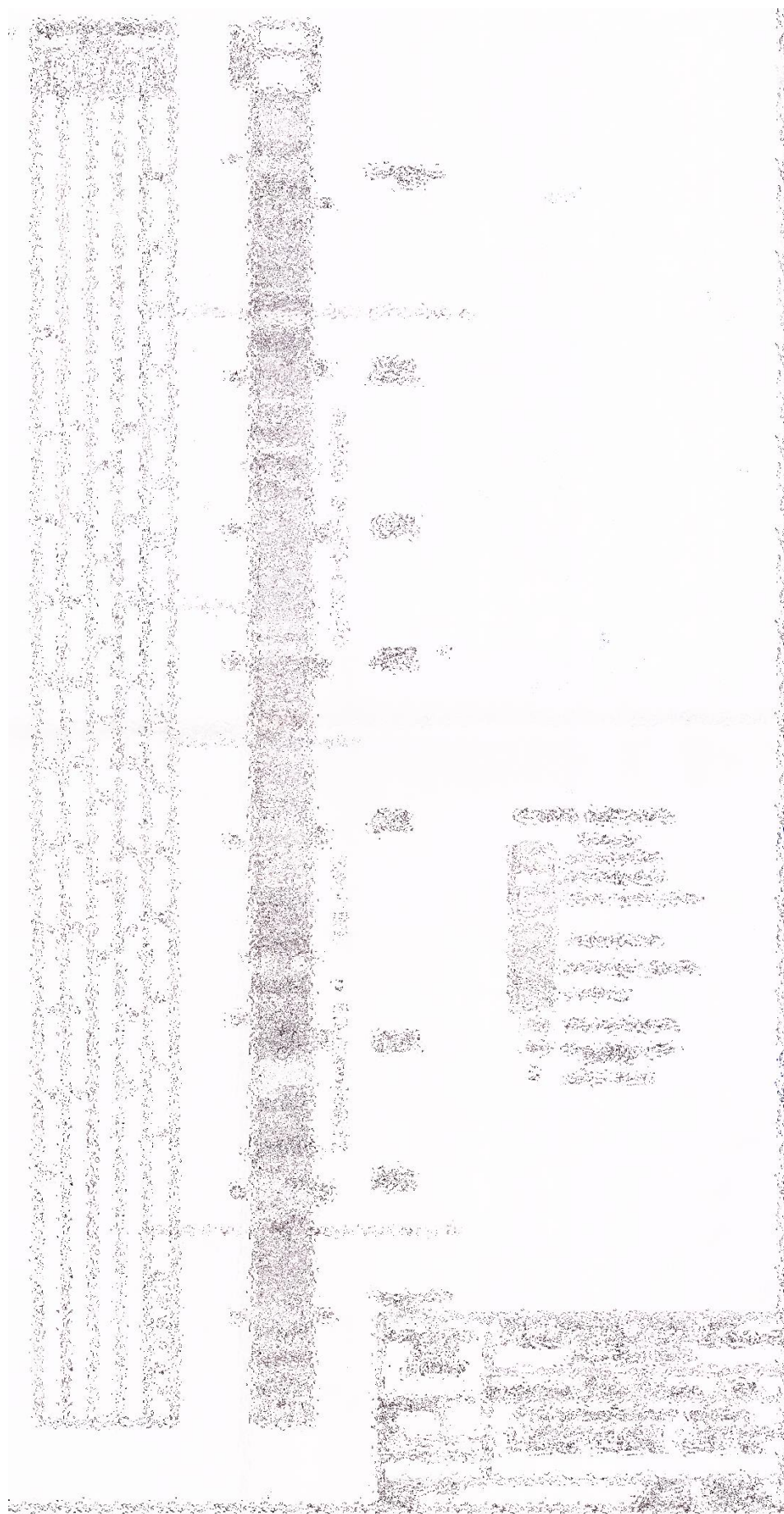


Рис. 2 Стратиграфическая колонка к геологической карте и карте полезных ископаемых Бадранского рудного узла. [Тютрин, 2002ф]

1.2. Магматизм

Магматические образования в пределах Бадранского рудного узла отсутствуют. Ближайший массив раннемеловых гранитов находится в 30 км к юго-востоку. По геофизическим данным [Бузиков, 1974 г.] предполагается нескрытый массив среднего состава размером 6 на 15 км. Предполагаемая глубина его залегания составляет не менее 3 км от дневной поверхности.

1.3. Метаморфизм

В пределах Бадранского рудного узла породы претерпели региональный метаморфизм на уровне зеленосланцевой фации [Ахьяев, 1975ф]. Тем не менее в ходе работ СПбГУ 2015-2016гг характерных минералов в породах для данной фации найдено не было, что позволяет судить о том, что породы находятся либо на совсем низкой стадии зеленосланцевого метаморфизма или не подвержены таковой совсем.

1.4. Тектоника

Бадранское рудный узел находится в юго-восточной части Верхоянского мегантиклинория, на юго-восточном своде Эльгинской синклинали. [по А.А. Константиновскому, С.Д. Соколову и др.]

В тектоническом строении Бадранского рудного узла участвуют Талалахская и Селериканская антиклинали и разделяющая их Мугурдахская синклиналь. Данные структуры являются структурами первого порядка для данного района работ.



Рис. 3 Тектоническая схема Бадранского рудного узла. [Тютрин, 2002ф]. 1 – структурные линии, 2 – пикативные структуры I порядка [Ахъяев, 1975ф], 3 – оси складок II порядка, 4 – взбросо-надвиги, 5 - взбросы

Талалахская антиклиналь представлена юго-западным крылом, обнажающимся на северо-востоке рассматриваемой территории. Сложена породами сюрэмпинской и быйттахской свит. Отложения имеют общее падение на юго-запад с углами от 5° до 40° и отличаются слабой дислоцированностью. Складки наблюдаются вблизи сочленения с Мугурдахской синклиналью. Характеризуются ассиметричным строением, с углами падения крыльев от 15° до 70° . Разделяется Талалахская антиклиналь от находящейся юго-западной Мугурдахской синклинали Бадран-Эгеляхским взбросо-надвигом.

Мугурдахская синклираль занимает центральную часть площади. Структура сложена породами черняйской и былыньинской свит отличающихся здесь особенной

дислоцированностью. Ширина Мугурдахской синклинали 7-10 км, которая осложнена серией кулисообразно расположенных складок высоких порядков. Они отличаются значительной протяжённостью 10-20 км при ширине 2-3 км. По данным геофизических исследований выделяется зона глубинного Мугурдах-Селериканского разлома северо-западного простирания, пространственно совпадающего с Мугурдахской синклиалью.

Селериканская антиклиналь занимает южную часть площади работ и выделяется по поднятию вновь сюррампинской и быйтахской свит. Отличается ассиметричной структурой с углами падения не более 20° - 40° .

Мелкоамплитудная складчатость в пределах Бадранского рудного узла развита сравнительно слабо. Представлена в основном приразломными дисгармоничными складками с крутыми (до опрокинутого) залеганиями крыльев.

Складчатые структуры изученной площади в значительной степени осложнены дезъюнктивами преимущественно запад-северо-западного и северо-северо-западного простирания. Резко подчиненную роль имеют разломы северо-восточного направления. Крупные разломы часто ветвятся, теряют амплитуду, а при значительной монотонности разреза, по ним практически невозможно определить характер перемещений и взаимоотношений между разнонаправленными разломами. По простиранию строение зон разломов сильно изменчиво, мощность на коротких расстояниях может меняться от 0.2 до 5 м. В разных своих частях они представлены зонами дробления и милонитизации, зонами кварцевого и карбонат-кварцевого прожилкования, не редко с золотым оруденением. Минерализация по ним также распространена крайне неравномерно. Тем не менее разломы для данной территории являются основными рудовмещающими структурами.

1.5. Полезные ископаемые

Бадранский рудный узел расположен в пределах Селериканской золотоносной зоны. Полезные ископаемые представлены месторождениями, проявлениями и пунктами минерализации, шлейфами россыпного золота. Реже сурьмяной и вольфрамовой минерализации.

Все россыпное золото относится к аллювиальному долинного типа и локализуется в спавой части аллювия и разрушенных коренных породах.

Коренное золото территории приурочено к нескольким участкам: Лео-Тумаринской перспективной площади, Танинскому, Надеждинскому, и Бадранскому рудным полям. Последнее является объектом данной работы, поэтому на нем стоит остановиться чуть подробнее.

1.6. Бадранское рудное поле

Бадранское рудное поле находится на севере Бадранского рудного узла. С 1984 г лицензия на объект принадлежит ЗАО ГРК «Западная». Основной рудовмещающей структурой является шовная часть Бадран-Эгеляхского взбросо-надвига. В пределах рудного поля золотоносная часть взбросо-надвига получила название зона «Надвиговая».

В пределах рудного поля выделяется 5 рудных столбов и несколько участков: Безводный, Западный, Восточный, Хороший и др..

В пределах рудного поля углы падения плоскости сместителя от 25° до 57° . Сложена она минерализованной зоной дробления с вложенной в нее одной или несколькими стержневой жилами. Мощность зоны варьирует в среднем от 0.5 до 4.5 м, в раздувах до 10 м. [Неустроев, 2002; Яловик, 2016]. Жильная часть зоны может иметь как простое, так и сложное строение, вплоть до формирования эшелонированных стержневых тел. Мощность жильной составляющей зависит от мощности зоны, но не превышает 0.4-2.2 м. [Тютрин, 2002ф]

Бадранское рудное поле относится к полиформационному ряду с проявлением золото-сульфидной (золото-пирит-арсенопиритовой), малосульфидной (золото-пирит-арсенопирит-галенит-сфалерит с сульфоантитимонидами) и золотокварцевой формации с полистадийной минерализацией: золото-пиритовой, золото-пирит-арсенопиритовой, золото-галенит-сфалеритовой, золото-блеклорудной с редуцированной золото-серебро-сульфоантимонитовой. [В.А. Амузинский, 1984]

Минеральная зона дробления представляет собой брекчии, сцементированные тонкими кварц-карбонатными прожилками с полисульфидной минерализацией. Обломки пород от 0.5 до 30 см преимущественно состоят из алевролитов, реже песчаников с неравномерными вкраплениями тонкозернистого пирита, марказита, арсенопирита. Общее количество сульфидов в брекчиях 1-5%. В приповерхностных частях, зоне окисления, зона дробления превращена в труху и глину. В ней сульфидной минерализации не устанавливается, а в процессе промывки обнаруживаются гидрокислы железа, скородит и золото.

Не окисленная стержневая жила представлена телами линзовидно-полосчатой текстуры, в кровле брекчевидной, в центре массивной текстуры. Сложена кварцем с четкими границами в составе зоны дробления. Кварц от средне- до крупнозернистого, поздний содержит занорыши и мелкие друзы горного хрусталя. Мощность жил не выдержанная. Свободное золото тяготеет к участкам сильного катаклаза, наложения разных стадий минерализации, к зальбандам жил, углисто-глинистым примазкам,

пустотам выщелоченых сульфидов, трещинам в кварце, границам зерен кварца и сульфидов. Сульфидная минерализация ранних стадий вкрапленная, поздних – прожилково-вкрапленная, реже линзовидная.

Стержневая часть жильной массы на поверхности представлена перетертой, интенсивно катаклазированной массой кварца, реже карбоната, серицита. После промывки устанавливаются гидроокислы железа, скородит, гидрокарбонаты меди и золото. [Тютрин, 2002ф]

Глава 2. Геологическое строение Бадранского рудного поля по данным СПбГУ

С момента последних работ по картированию поверхности до 2015 гг с дневной поверхности рудного поля было пробуренно множество буровых скважин. Для передвижения буровых машин было сделано множество дорог, а для их деятельности буровых площадок. В ходе этих работ было сделано множество хороших обнажений коренных пород. Которые легли в основу полевых работ Геологического центра СПбГУ в 2015-2016 гг.

В ходе этих работ на поверхности Бадранского рудного поля было задокументировано более 30 п. км интервалов наблюдения, 522 точки наблюдения (границы литологических пачек, разрывные нарушения, осевые плоскости, границы коренных обнажений и пр.). Сделано около 510 замеров слоистости, прожилков и жил, разрывных нарушений, трещин отдельности, кливажа и сланцеватости, осевых плоскостей и шарниров складок.

Новые данные получены в основном в районе юго-восточной сопки (юго-восточная часть плана). На остальных частях полигона обнаженность стремилась к нулю, поэтому для составления этих участков за основу были взяты карты предшественников

На территории Бадранского рудного поля в рамках данной работы было выделено несколько толщ примерно соответствующих некоторым свитам предшественников. Нижняя и средняя толщи находятся в висячем крыле зоны «Надвиговая», верхняя в лежащем.

Первая (нижняя) примерно соответствует сюрэмпинской свите. Обнажается в центральной и северной части плана. В нижней части толщи по данным бурения наблюдается достаточно мощная пачка переслаивания алевролитов и песчаников, с преобладанием песчаников. В верхней части толщи в переслаивании преобладают алевролиты, часто встречаются текстуры нагрузки и нарушенная слоистость. Примерно посередине преимущественно алевролитовой пачки наблюдается небольшая пачка массивных песчаников с коническими ихнофоссилиями, предположительно *Monocraterion* или *Laevicyclus* [McIlroy, Garton, 2009]. Не полная мощность толщи более 277 м.

Средняя толща соответствует нижней и средней бейттахским подсвитам. Выходит на дневную поверхность в восточной и юго-восточной частях плана.

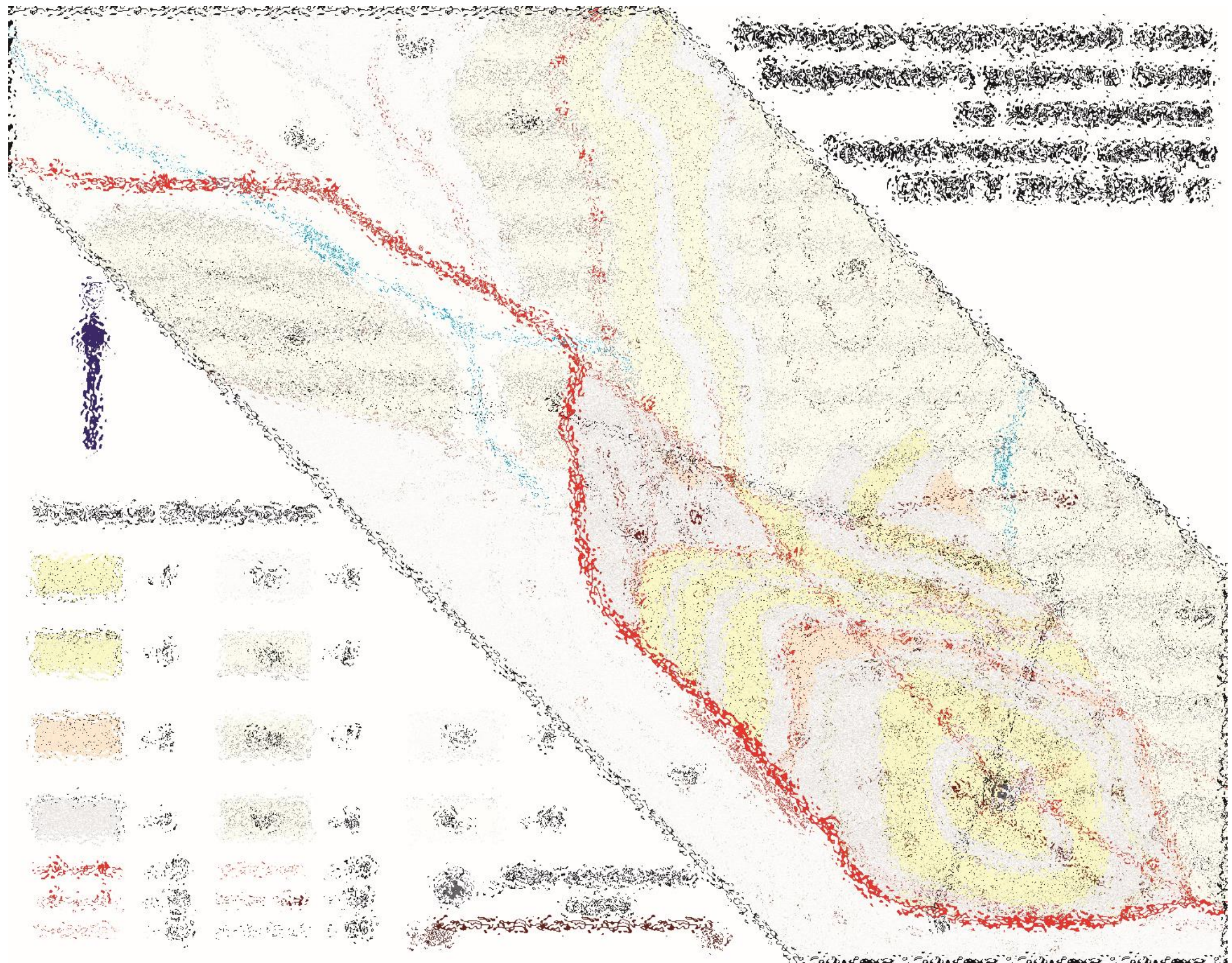


Рис. 4 Литолого-структурный план по материалам Геологического центра СПбГУ 2015-2016 гг. 1-4 Литологические пачки (по данным Геологического Центра СПбГУ): 1 – песчаников, грубослоистого переслаивания, с единичными слоями гравелитов и гравелистых песчаников; 2 – тонкого переслаивания алевролитов и песчаников с преобладанием песчаников; 3 – песчаников с коническими ихнофоссилиями; 4 – тонкого переслаивания песчаников и алевролитов с преобладанием алевролитов. 5-10 Свиты (по данным ВИГРЭ [Тютрин, 2002 и др.]): 5 – сюрмтинская свита, пачки алевролитов, с редкими прослоями песчаников; 6 и 7 – быттахская свита, нижняя и средняя соответственно; пачки песчаников с редкими прослоями алевролитов; 8 – черняйская свита, пачки переслаивания песчаников и алевролитов с преобладанием первых; 9 – балынинская свита, пачки песчаников и песчанистых алевролитов, 10 – четвертичные отложения; аллювий, пролювий. 11-14 разрывные нарушения: 11 – надвиги; 12 – сбросы; 13 – разрывные нарушения неустановленной кинематики; 14 – предполагаемые разрывные разрушения; 15 – оси складок

Толща представлена грубым переслаиванием песчаников и алевролитов. В основании толщи наблюдаются остатки растений. Примерно посередине толщи наблюдается пачка песчаников с коническими ихнофоссилиями, аналогичными нижней толще. В верхней части толщи песчаники начинают преобладать. По всей толще встречаются текстуры нагрузки и линзы гравелитов и конгломератов, реже нарушенная слоистость. Мощность толщи не полная более 347 м.

Верхняя толща соответствует былъиньинской и черняйской свитам и находится на западе и юго-западе территории. Обнажения данной толщи в ходе работ СПбГУ описаны не были, поэтому она не была добавлена общую литолого-стратиграфическую колонку. Выделена была по работам предшественников.

На рассматриваемой территории выделяются структуры первого порядка: относительно моноклиналиное залегание с падением на юг и юго-запад под углами 10° - 30° и надвиг в виде зоны «Надвиговая». Структуры первого порядка осложнены послойными срывами, сбросами и складчатостью второго порядка преимущественно северо-западного простирания. Они в свою очередь осложнены мелкими разрывными нарушениями неустановленной кинематики и мелкой складчатостью не отображенных на плане.

В нижней толще наблюдаются наиболее интенсивная складчатость. На дневной поверхности обнажается две антиклинальные асимметричные складки юг-юго-восточного простирания с падением шарнира на юг-юго-восток. Падения восточного крыла от 40° до субвертикального, западного 20° - 30° .

В средней толще на северо-западном склоне юго-восточной сопки обнажается достаточно моноклиналиное залегание на юго-восток осложненное парой послойных срывов: нижним - отделяющим нижнюю и верхнюю толщи, и верхним - располагающимся внутри толщи. На юго-восточном склоне сопки находится асимметричная синклиналиная складка с углами падения крыльев около 20° и 70° южного и северного крыла соответственно и падением шарнира на северо-запад. Через вершину сопки и примыкая к зоне «Надвиговая» находится сброс, неизвестной амплитуды смещения и направления падения плоскости сместителя.



*Рис. 5 Литолого-стратиграфическая колонка Бадранского рудного поля по данным Геологического центра СПбГУ. 1 - текстуры нагрузки, 2 – нарушенная слоистость, 3 – ихнофоссилии *Monocraterion* sp., 4 – остатки растений, 5 – признаки текстур биотурбации, 6 – линзы гравелитов и конгломератов*

Но учитывая его примыкание к основному надвигу, можно полагать о его падении в сторону основного надвига. На северном и восточном склонах сопки юго-восточная наблюдается открытая складка с падением шарнира на юго-запад. Северное крыло падает на юг-юго-запад под

углами 10°- 30°, восточное крыло падает на запад под углами 20°- 30°. В северном крыле наблюдаются послойные срывы. В истоке ручья Бедовый находится закрытая антиклинальная складка с падением шарнира на северо-восток.

Через данные структуры построены 2 разреза (рис. 6 и рис 7).

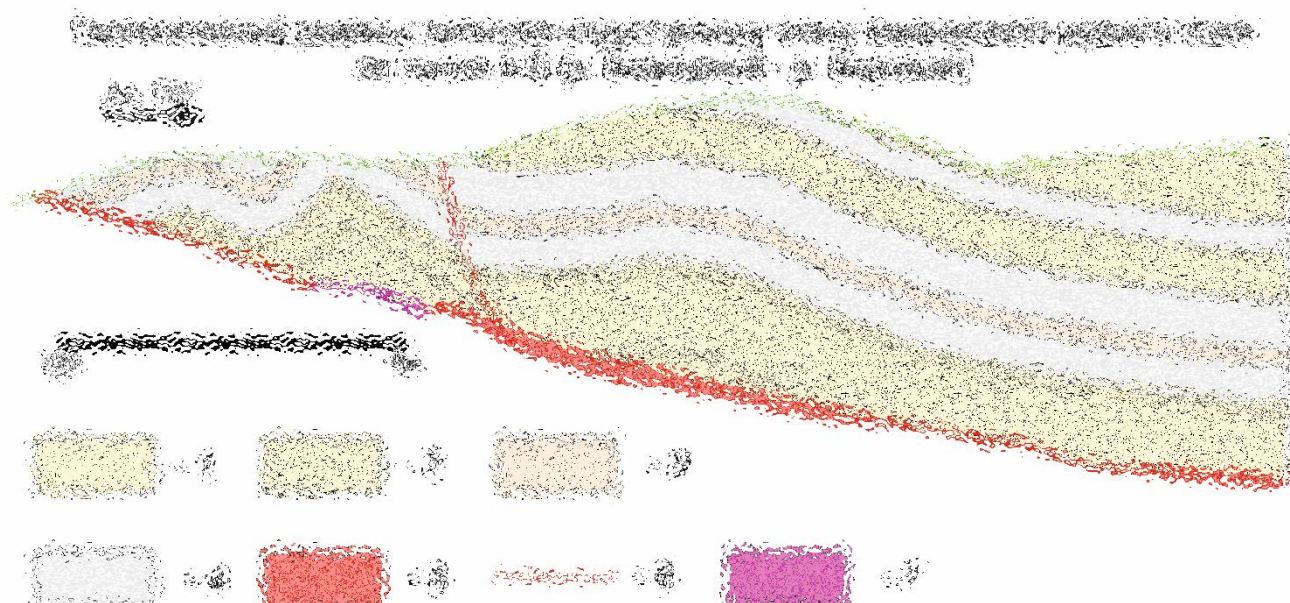


Рис. 6 Геологический разрез к литолого-структурному плану Бадранского рудного поля по линии А-Б (р. Безводный – р. Бедовый) 1-4 Литологические пачки (по данным Геологического Центра СПбГУ): 1 – песчаников, грубослоистого переслаивания, с единичными слоями гравелитов и гравелистых песчаников; 2 – тонкого переслаивания алевролитов и песчаников с преобладанием песчаников; 3 – песчаников с коническими ихнофоссилиями; 4 – тонкого переслаивания песчаников и алевролитов с преобладанием алевролитов. 5-6 Разрывные нарушения: 5 – надвиги (зона «Надвиговая»); 6 – сбросы; 7 – надвиги с известной минерализацией (рудные тела).

В связи с неравномерным распределением полезной минерализации по зоне «Надвиговая», имеет смысл связать повышенные концентрации с какими-либо структурами или литологическими пачками.

По разрезу АБ, пересекающему слепое рудное тело – участок «Безводный», можно судить, что полезная минерализация связана ядром антиклинальной складки, наблюдаемой в нижней толще. В разрезе ВГ оруденение находится в приповерхностной части. Структурно оно получилось привязано только к мелкой принадвиговой складчатости.

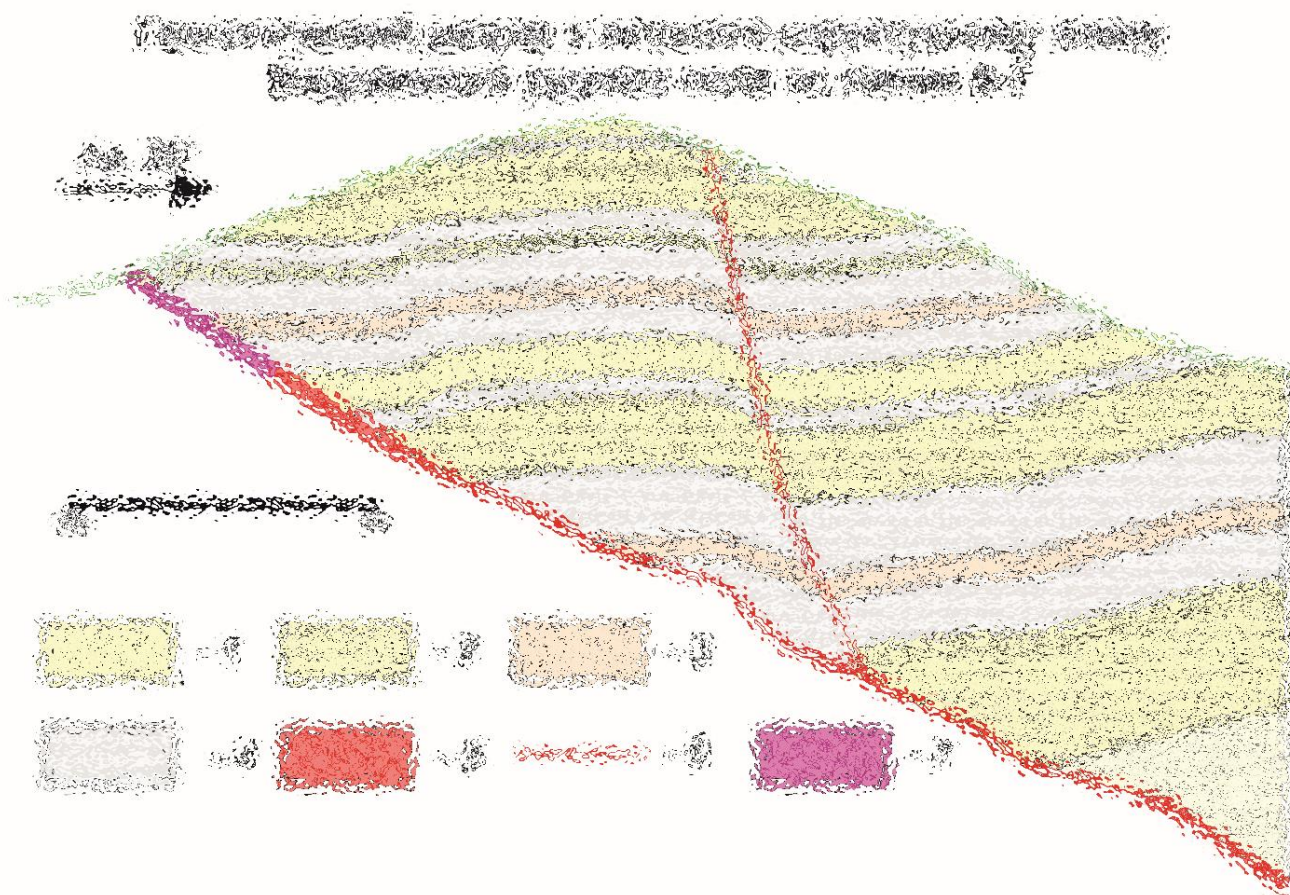


Рис. 7 Геологический разрез к литолого-структурному плану Бадранского рудного поля по линии В-Г. 1-4 Литологические пачки (по данным Геологического Центра СПбГУ): 1 – песчаников, грубослоистого переслаивания, с единичными слоями гравелитов и гравелистых песчаников; 2 – тонкого переслаивания алевролитов и песчаников с преобладанием песчаников; 3 – песчаников с коническими ихнофоссилиями; 4 – тонкого переслаивания песчаников и алевролитов с преобладанием алевролитов. 5-6 Разрывные нарушения: 5 – надвиги (зона «Надвиговая»); 6 – сбросы; 7 – надвиги с известной минерализацией (рудные тела).

Литологически оруденение зоны «Надвиговая» связано с нижними частями средней и нижней толщ. По разрезу АБ с нижней частью нижней толщи: пачкой переслаивания песчаников и алевролитов с преобладанием последних. А по разрезу ВГ к нижней части средней толщи, где преобладают алевролиты.

Глава 3. Методика расчёта тектонофизических параметров

Расчет параметров напряженного состояния на момент рудообразования для поверхности зоны «Надвиговая» можно разделить на несколько этапов:

1. Построение трехмерной модели поверхностей кровли и подошвы зоны «Надвиговая»
2. Определение ориентировки и величин региональных напряжений
3. Расчет при помощи программного обеспечения для каждой из площадок, составляющих криволинейную поверхность зоны «Надвиговая», параметров напряженного состояния.

3.1 Построение трехмерной модели

Построение трехмерной модели было выполнено в горно-геологической информационной системе (ГГИС) Micromine, по данным документации горных выработок и колонкового бурения. построены трёхмерные соединительные линии (стринги) соединяющие точки пересечения выработок с кровлей и подошвой зоны Надвиговая, всего 2631 точка пересечения.

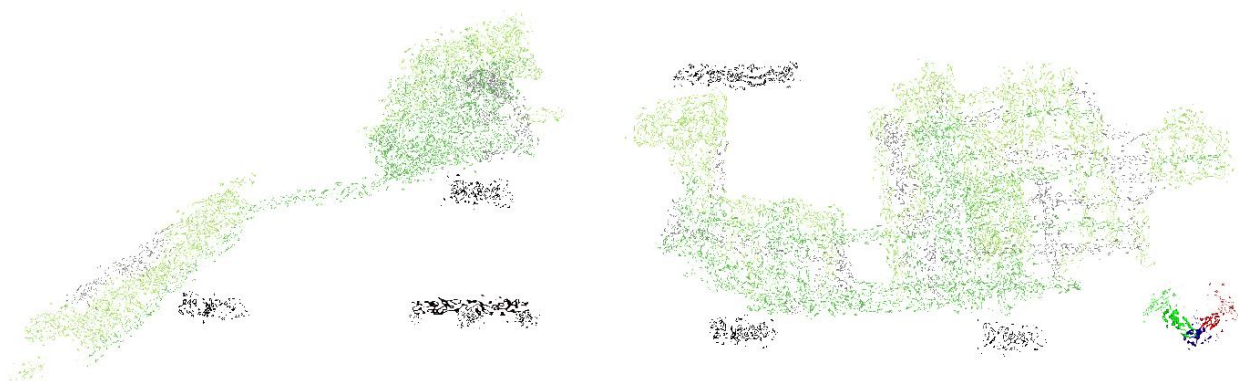


Рис. 8 Совмещенный план расположения соединительных линий подошвы зоны Надвиговой. Цвет линий обозначает источник для построения линий: тёмно-зеленый – горные выработки, светло-зеленый – скважины, серый – предполагаемые, интерполированные между выработками.

Далее этот «скелет» (соединительные линии) были объединены в каркасы (криволинейные поверхности).

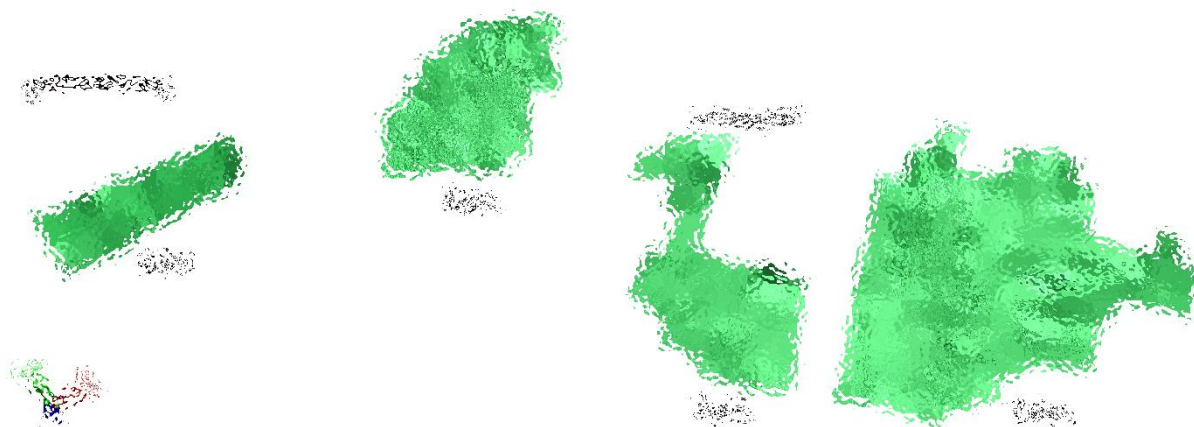


Рис. 9 План расположения каркасов интерполированной поверхности подошвы зоны Надвиговая

Следующим шагом было определение ориентировки линий проецирования для экстраполяции поверхностей кровли и подошвы на глубину или между рудными столбами. Ориентировка линий проецирования определялась как средняя по моде линия падения для третьего и четвертого и как шарнир складок для первого и второго рудных столбов. Поверхности для каждого из рудных столбов были экстраполированы на глубину до абсолютной отметки 400 м, до земной поверхности, между собой и объединены в единую поверхность.

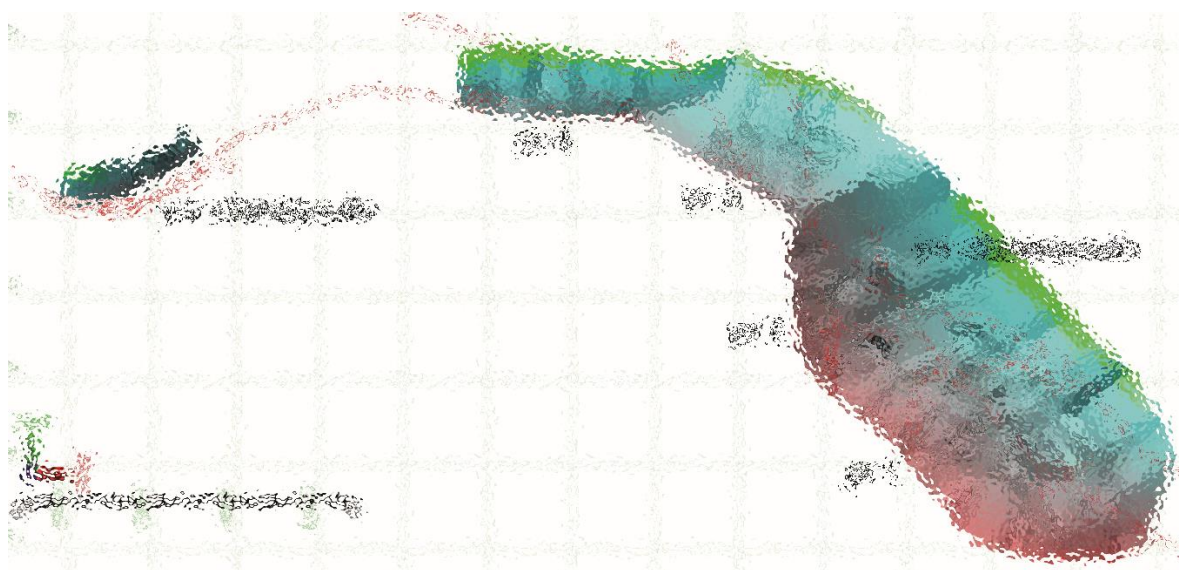


Рис. 10 План объединенной поверхности подошвы зоны Надвиговой. Цветом обозначена абсолютная высота (синий – низкие участки, бурый – высокие участки, зеленый – ниже абсолютной отметки 400 м).

Далее построенные поверхности кровли и подошвы зоны «Надвиговая» были переведены в сетку 20х20 м, для сглаживания кривизны поверхности и устранения артефактов построения. После выполнения вышеописанных операций поверхности готовы для тектонофизических вычислений.

3.2 Расчет ориентировки и величины региональных (внешних) напряжений

3.2.1. Ориентировка

Специальными структурными исследованиями в подземных и поверхностных горных выработках В.Ю. Фридовским [Фридовский, 1999] были изучены трещинные элементы и реконструировано тектоническое поле напряжений в соответствии с известными методическими приемами [Гзовский, 1975; Данилович, 1961; Шерман, Зоны Надвиговая Днепровский, 1989]. (Рис. 11)

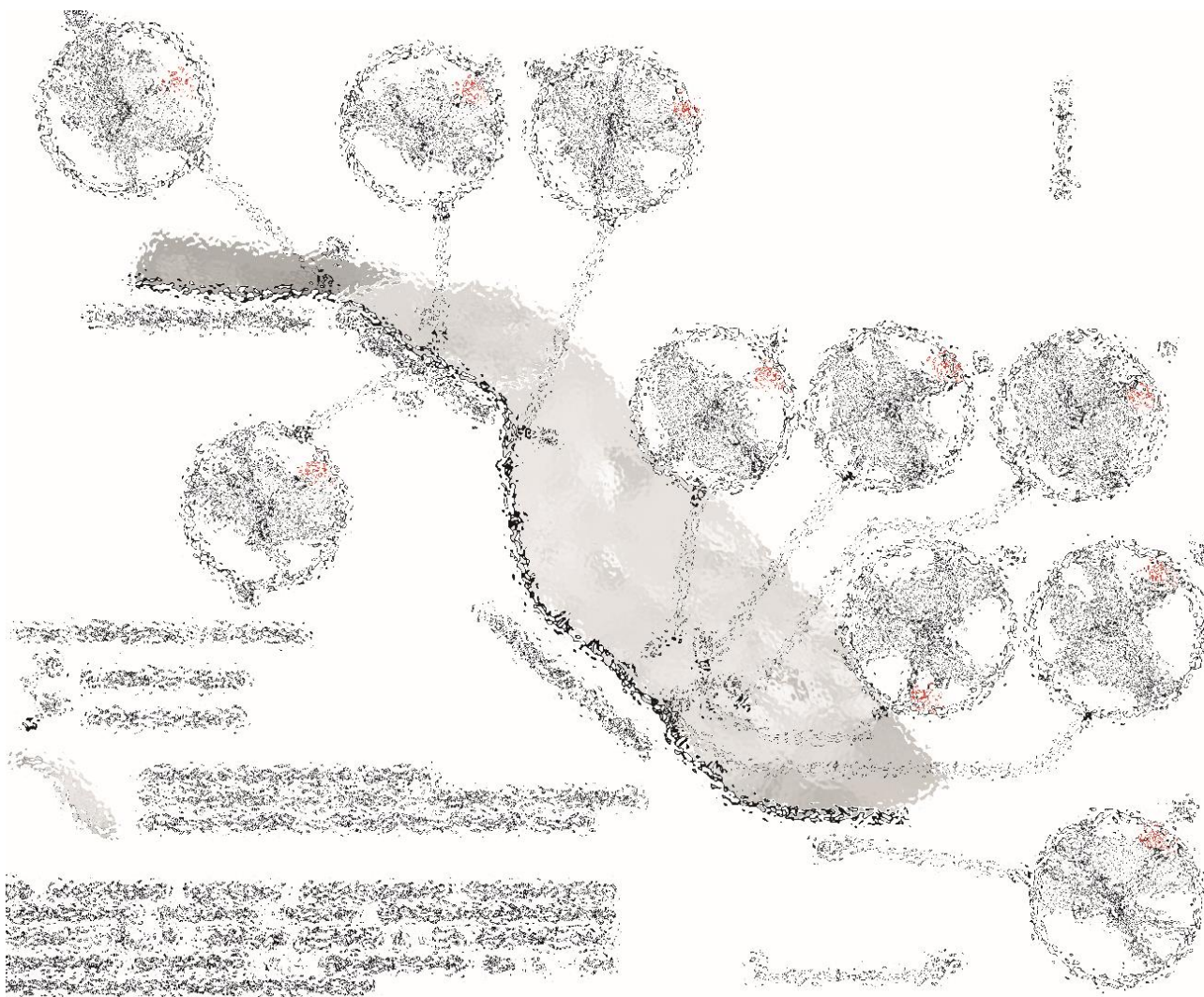


Рис. 11 План основной зоны «Надвиговая» с диаграммами реконструкции тектонического напряженного состояния [Фридовский, 1999].

Ориентировка осей максимальных сжимающих напряжений в центральной части Зоны Надвиговая характеризуется юго-западным субгоризонтальным или умеренно наклонным положением. Оси минимальных сжимающих напряжений располагаются субвертикально или круто ($65-70^\circ$) наклонены к северо-востоку или юго-западу. Для центрального участка Зоны Надвиговая устанавливаются надвиговые перемещения, которые в краевых направлениях сменяются преимущественно левосдвиговыми (с незначительной взбросовой компонентой) смещениями.

В ходе работ Геологического Центра СПбГУ в точке наблюдения 454-8 (рис. 12) была обнаружена антиклинальные складки, также маркирующие, что одна из тектонических стадий развития зоны «Надвиговая» имела надвиговую кинематику.



Рис. 12 Фото точки наблюдения 454-8. На азимутальной проекции: Красным – плоскость зоны «Надвиговая», черным – крылья складки, синим пунктиром – осевая плоскость складки.

Ориентировка осей региональных напряжений была вычислена как ориентировка максимума плотности частных осей напряжений, рассчитанных для всех участков зоны «Надвиговая» [Фридовский, 1999]. Локальные оси максимального сжатия показали на азимутальной проекции кластерное, а оси минимального сжатия и промежуточные оси – слабое поясное распределение, поэтому субгоризонтальная ориентировка оси максимального сжатия была принята за определяющую, ориентировка оси минимального сжатия – субвертикальная, ориентировка промежуточной оси рассчитывалась из условия взаимно-перпендикулярного расположения главных осей напряжения.

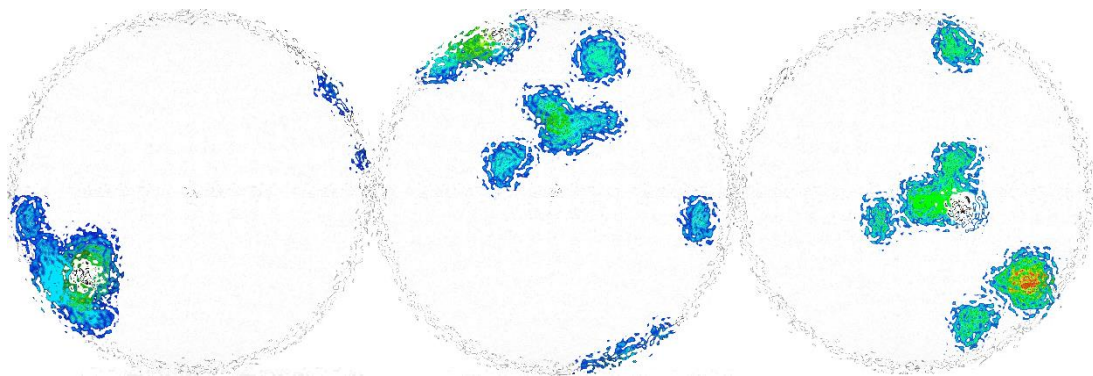


Рис. 13 Ориентировка главных осей регионального напряжения, рассчитано по [Фридовский, 1999]

Таким образом, были получены ориентировки региональных осей напряжения:

σ_3 = аз. пад. 232, уг. пад 22

σ_2 = аз. пад. 331, уг. пад 20

σ_1 = аз. пад. 99, уг. пад 59

В январе 2017 г в ходе проходки новой штольни было вскрыто слепое рудное тело в районе участка «Безводный» (рис 14).

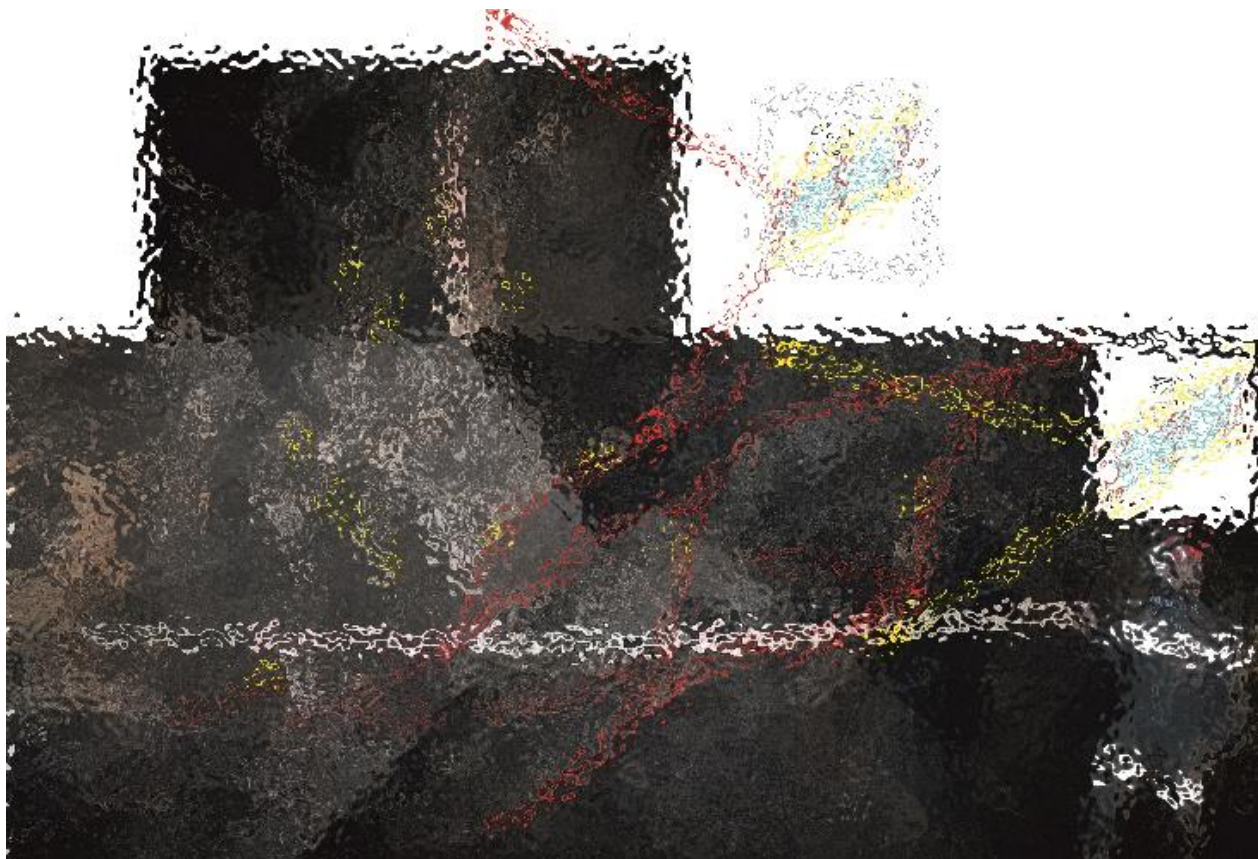


Рис. 14 Дешифрованное фото зоны «Надвиговая» в районе участка «Безводный»

Данная фотография позволяет полагать, что один из тектонических этапов развития зоны «Надвиговая» мог иметь сбросовую кинематику.

Из-за этого в рамках данной работы было решено промоделировать и сбросовую кинематику. Для этого было необходимо изменить эллипсоид деформаций. Направление осей было оставлено без изменений, но направление сжатия - σ_3 изменено местами с направлением растяжения - σ_1 . В результате сжатие оказалось вертикальным, а растяжение горизонтальным, что соответствует сбросовой обстановке.

σ_1 = аз. пад. 232, уг. пад 22

σ_2 = аз. пад. 331, уг. пад 20

σ_3 = аз. пад. 99, уг. пад 59

3.2.2. Величины региональных напряжений

Величина субвертикального главного напряжения была рассчитана как литостатическое давление по следующей формуле:

$$\sigma_z = -\rho gh = -2700 * 9.8 * 7000 = 185.2 \text{ МПа}$$

σ_z – субвертикальное главное напряжение, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения, h – мощность всех вышележащих пород

Глубина взята, как сумма всех вышележащих пород на момент образования надвига. Были учтены норийские, рэтские и юрские отложения с общей мощностью около 7 км. Плотность взята как средняя для осадочных пород высоких стадий эпигенеза - 2.7 г/см³. Ускорение свободного падения усреднено до 9.8 м/с².

Для расчета величин главных напряжений по осям σ_1 , σ_2 и σ_3 были использованы следующие формулы [А. Надаи, 1954]:

$$\sigma_1 = -p + \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau \quad \sigma_2 = -p + \frac{2\mu_\sigma}{3}\tau \quad \sigma_3 = -p - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau$$

σ_n – величины главных напряжений, p – средняя величина главных напряжений, τ – касательные напряжения, μ_σ – коэффициент Лоде-Надаи

Значение коэффициента Лоде-Надаи μ_σ было взято как 0.65, характеризующее напряженное состояние как одноосное сжатие (по характеру распределения локальных осей напряжений).

Также для упрощения вычислений, значения величин остальных главных напряжений (σ_2 , σ_3), были рассчитаны из условия, что в одном горизонтальном направлении в модели вертикальные жесткие стенки ($\varepsilon=0$):

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] = 0$$

ε – количество деформации, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга

Таким образом, при стандартных значениях механических констант для верхней части земной коры: коэффициент Пуассона $\nu=0.25$, модуль Юнга $E= 27000$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi= 30^\circ$ и сцепление $C= 10$ МПа, можно вычислить величины главных региональных напряжений решив систему уравнений [Ребецкий, 2007]:

для взброса:

$$\begin{cases} -p + \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau = -\rho g H \\ -p - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau = \varepsilon_3 E + \nu \left[-p + \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau - p + \frac{2\mu_\sigma}{3}\tau \right] \end{cases}$$

И сброса:

$$\begin{cases} -p - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau = -\rho g H \\ -p + \frac{2\mu_\sigma}{3}\tau = \nu \left[-p + \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau - p - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right)\tau \right] \end{cases}$$

Их алгебраические решения:

Для взброса:

$$\begin{cases} \tau = \frac{\rho g H (1 - 2\nu) - \varepsilon_3 E}{2 + \nu(\mu - 1)} \\ -p = \frac{\rho g H (1 + \nu)(3 + \mu) + (3 - \mu)\varepsilon_e E}{6 + 3\nu(\mu - 1)} \end{cases}$$

для сброса:

$$\begin{cases} \tau = \frac{-\rho g h (2\nu - 1)}{1 + \mu_\sigma - 2\nu} \\ -p = \frac{-2\mu_\sigma \rho g h (1 + \nu)}{3(1 + \mu_\sigma - 2\nu)} \end{cases}$$

В итоге решений данных уравнений были получены следующие значения региональных напряжений:

Взброс:

$$\sigma_3 = -506.7 \text{ МПа}$$

$$\sigma_2 = -241.5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_1 = -185.2 \text{ МПа}$$

Сброс:

$$\sigma_3 = -185,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_2 = -53,3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_1 = -24,2 \text{ МПа}$$

Для проверки расчетов использовалось уравнение для коэффициента Лодэ-Надаи:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$$

3.3. Расчет напряженных параметров для каждой из площадок зоны «Надвиговая»

Расчет напряженных параметров был выполнен в программном обеспечении Move (Midland Valley) по алгоритмам, используемым в программе Coulomb 3.4 в ПО MATLAB [Lin, Stein 2004; Toda, Stein, Richards-Dinger, Bozkurt, 2005], но имеющей удобные инструменты для анализа объёмной модели поверхности, расчетов параметров напряжения и визуализации результатов расчета. В рамках данной работы были использованы 3 параметра: Относительное расширяющее давление (Coulomb stress), кулоновы скалывающие напряжения (Dilation tendency) и объемное расширение (деформация) (Dilation).

Относительное расширяющее давление характеризует величину раскрытия разрывного нарушения, уже существующего в горном массиве. Относительное расширяющее давление R' характеризует величину флюидного давления относительно максимального и минимального главных напряжений [Baer et. al., 1994]:

$$R' = \frac{P_f - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1}$$

Если $R' < 1$, движение происходит путем скольжения вдоль стенок трещин без раскрытия её перпендикулярно к стенкам, если $R' > 1$, движение происходит путем скольжения вдоль стенок трещин с расширением её перпендикулярно к стенкам, совокупность ориентировок трещин определяется коэффициентом Лоде-Надаи для эллипсоида напряжений [Baer, Beyth, Reches, 1994; Войтенко, Задорожный, 2015].

Относительные кулоновы скалывающие напряжения характеризуют величины скалывающих напряжений, при которых формируются новые разрывные нарушения в горном массиве. Распределения величин кулоновых скалывающих напряжений во многом совпадает с распределением величин относительных сжимающих напряжений [Lin, Stein 2004; Toda, Stein, Richards-Dinger, Bozkurt, 2005].

Объемное расширение или дилатансия характеризует изменение объема, а на микроуровне представляет собой повышение пористости горных пород. Явление связано с появлением трещин отрыва в зонах формирования сдвиговых трещин, близких по ориентации к плоскости внутреннего трения. По проведенным экспериментам наибольшие значения параметра наблюдались у песчаников и в обстановках одноосного сжатия, которые мы и моделируем [Ребецкий, 2007].

Глава 4. Результаты расчетов тектонофизических параметров

Ниже приведены схемы с расчетами параметров относительного расширяющего напряжения, кулонова напряжения и объемного растяжения для кровли и подошвы зоны

«Надвиговая» в случае наибольшего сжатия в горизонтальном направлении – взброса, и в вертикальном направлении – сброса.

Сразу стоит сказать про ошибочные аномалии характерные для многих схем:

- Почти для всех схем характерны краевые аномалии. Мы их считаем артефактами, так как программное обеспечение считает, что отстроенная поверхность надвига является полной, то ближе к краям разрывного нарушения смещения уменьшаются до нуля. В нашем же случае, верхняя часть разрывного нарушения ограничена нынешней эрозионной поверхностью, а нижняя абсолютной отметкой в 400м.
- Наблюдаются артефакты на пространствах между четвертым и третьим, и третьим и вторым столбами. Они объясняются ошибками экстраполяции между соответствующими столбами.
- Вытянутые аномалии по падению надвига выражены не так ярко, но также скорее всего являются артефактами.

4.1. Взброс

4.1.1. Кровля

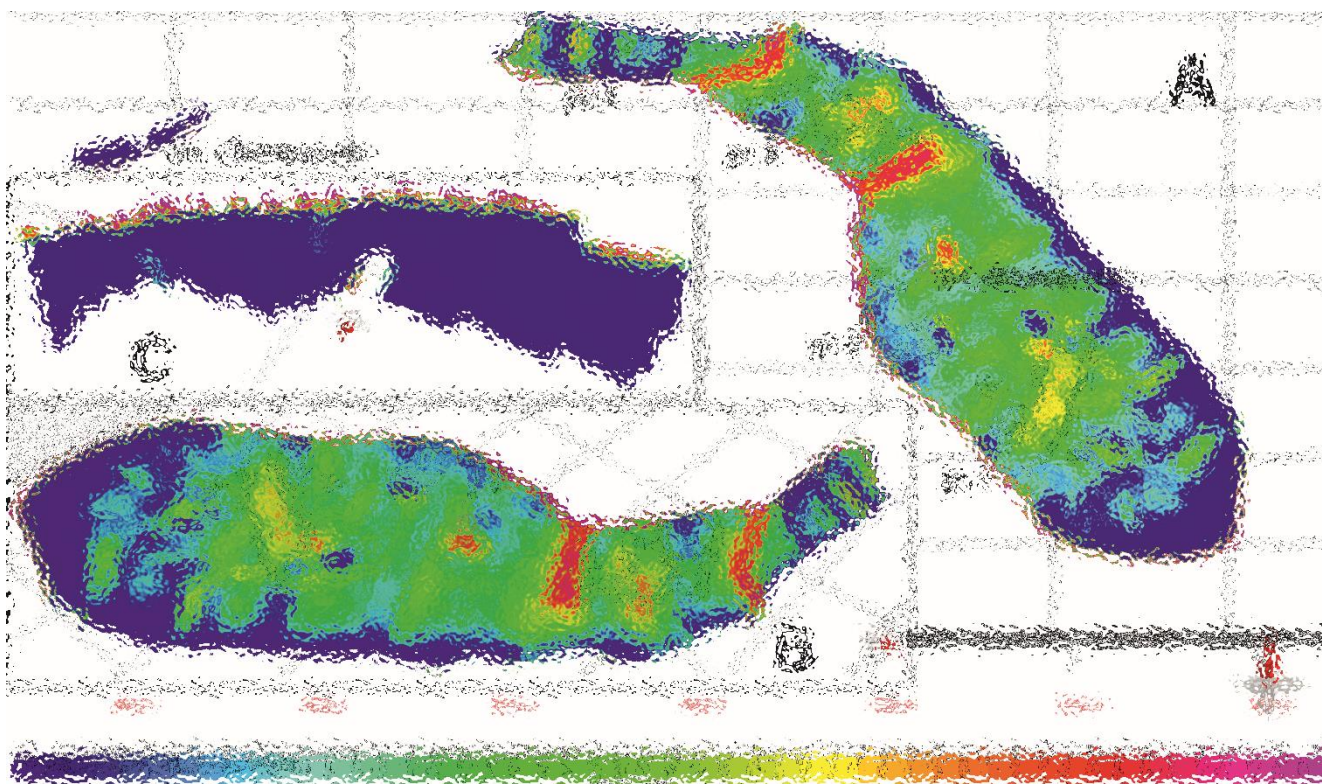


Рис. 15 Величины относительного расширяющего напряжения на поверхности кровли разрывного нарушения при взбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – скольжение вдоль поверхности разлома, Зеленый, желтый и красный – скольжение вдоль разлома с расширением стенок. Контурсы - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Для относительного расширяющего напряжения наблюдаются три положительные аномалии, более-менее связанные с известной минерализацией. Первая в глубокой части первого рудного тела, почти совпадающая с контуром жилы и продолжающаяся на север-северо-запад. Вторая аномалия, захватывающая третий рудный столб, имеет максимум глубже по падению надвига. Третья аномалия рядом с участком «Безводный» практически повторяет его форму и размер, но находится немного глубже по падению. На большей части надвига преобладают скалывающие напряжения, за исключением его юго-восточной части и «Западного» участка, где преобладают сжимающие напряжения.

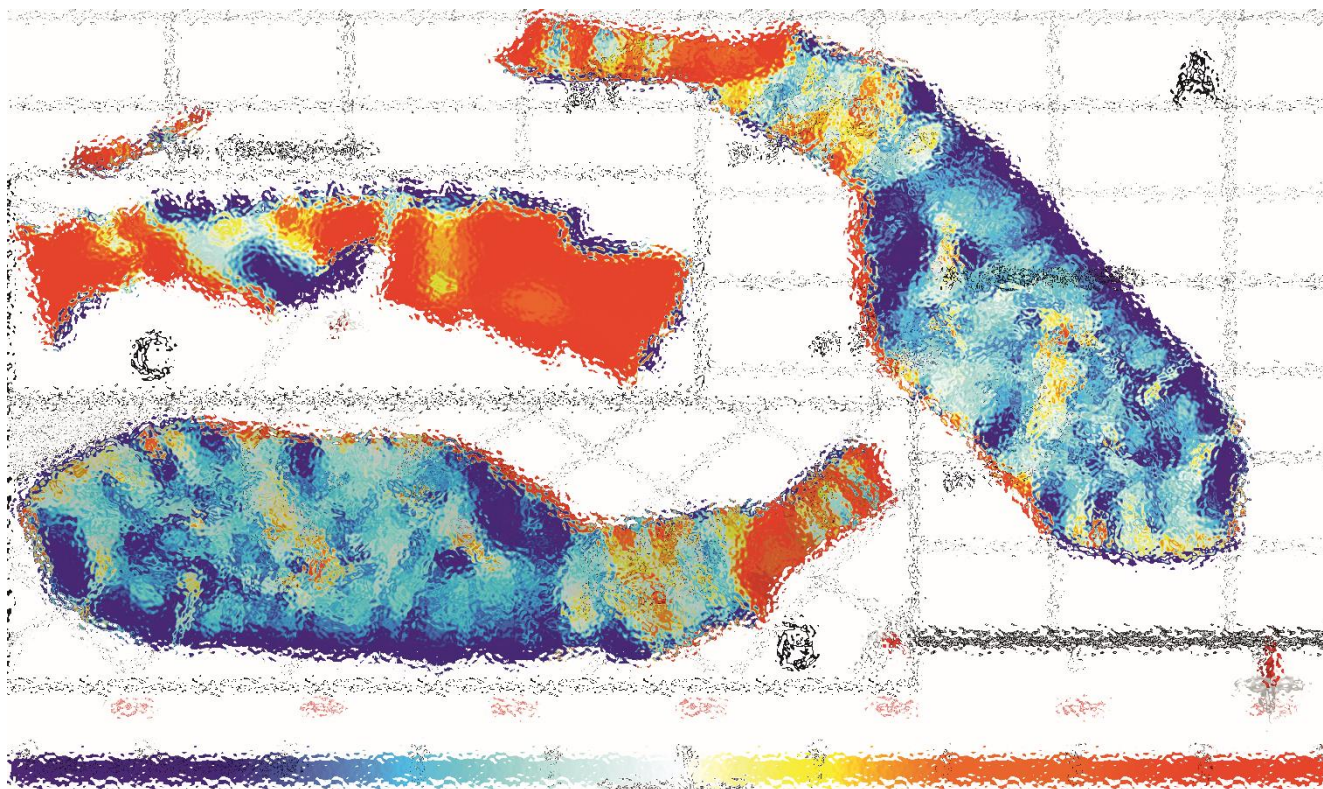


Рис. 16 Величины относительных кулоновых напряжений на поверхности кровли разрывного нарушения при взбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий цвет – минимальные напряжения, красный – максимальные значения. Контурь - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Схема для кулонова напряжения представляется более пестрой, а положительные аномалии почти совпадают с повышенными значениями относительного расширяющего давления. Отмечаются аномалии в районе первого рудного тела и участка «Безводный», а вот аномалия у третьего рудного тела стала значительно больше, чем в относительном расширяющем напряжении. Здесь она охватывает почти все жилы с повышенной полезной минерализацией и продолжается на глубину по падению надвига. Кроме того наблюдаются крупные положительные аномалии на всю плоскость надвига в районе 4 рудного тела и участка «Западный». Остальную часть зоны «Надвиговая» занимают отрицательные значения.

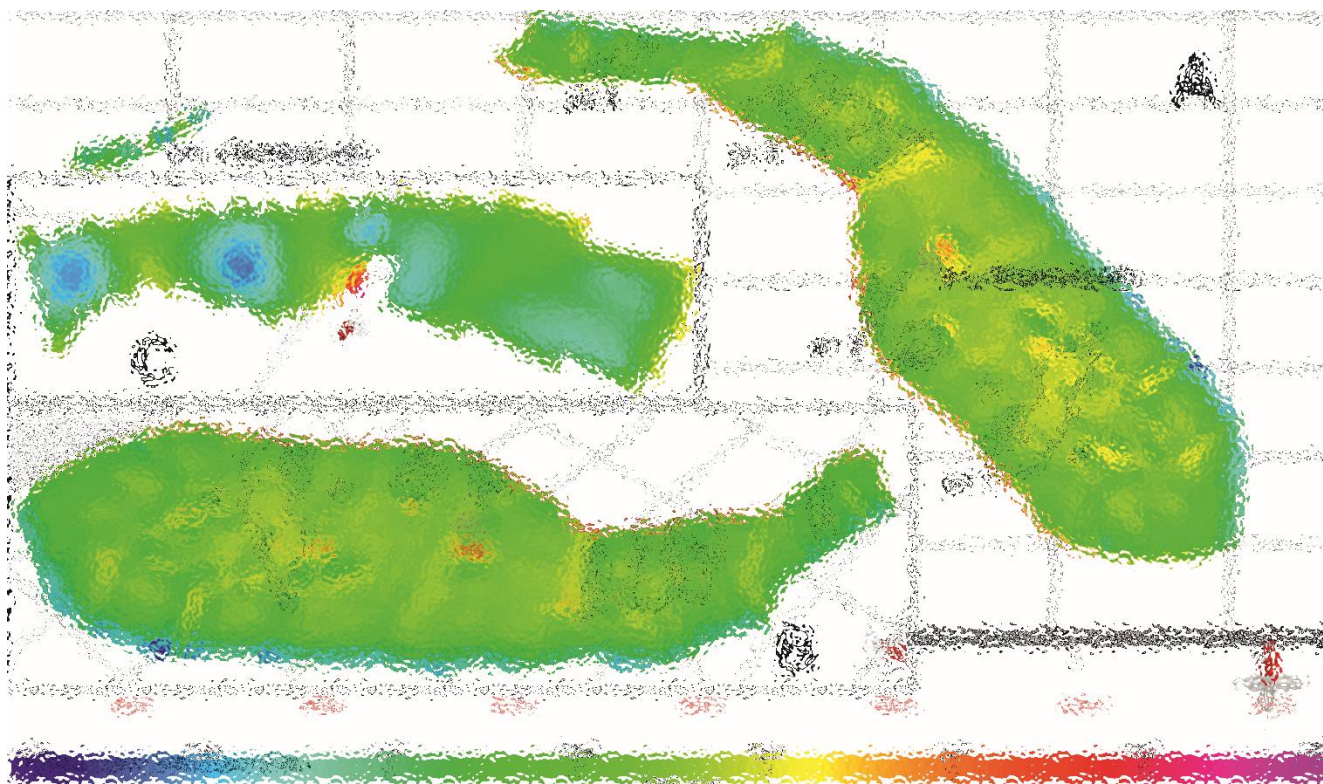


Рис. 17 Величины объемного расширения на поверхности кровли при взбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – сжатие, красный и фиолетовый – растяжение. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Схема объемного расширения наоборот не отличается высокой контрастностью. На фоне доминирующего не высокого сжатия, выделяются небольшие хаотичные около нулевые значения в районе первого и третьего рудных тел, и небольшая положительная аномалия рядом с участком «Безводный».

4.1.2. Подошва

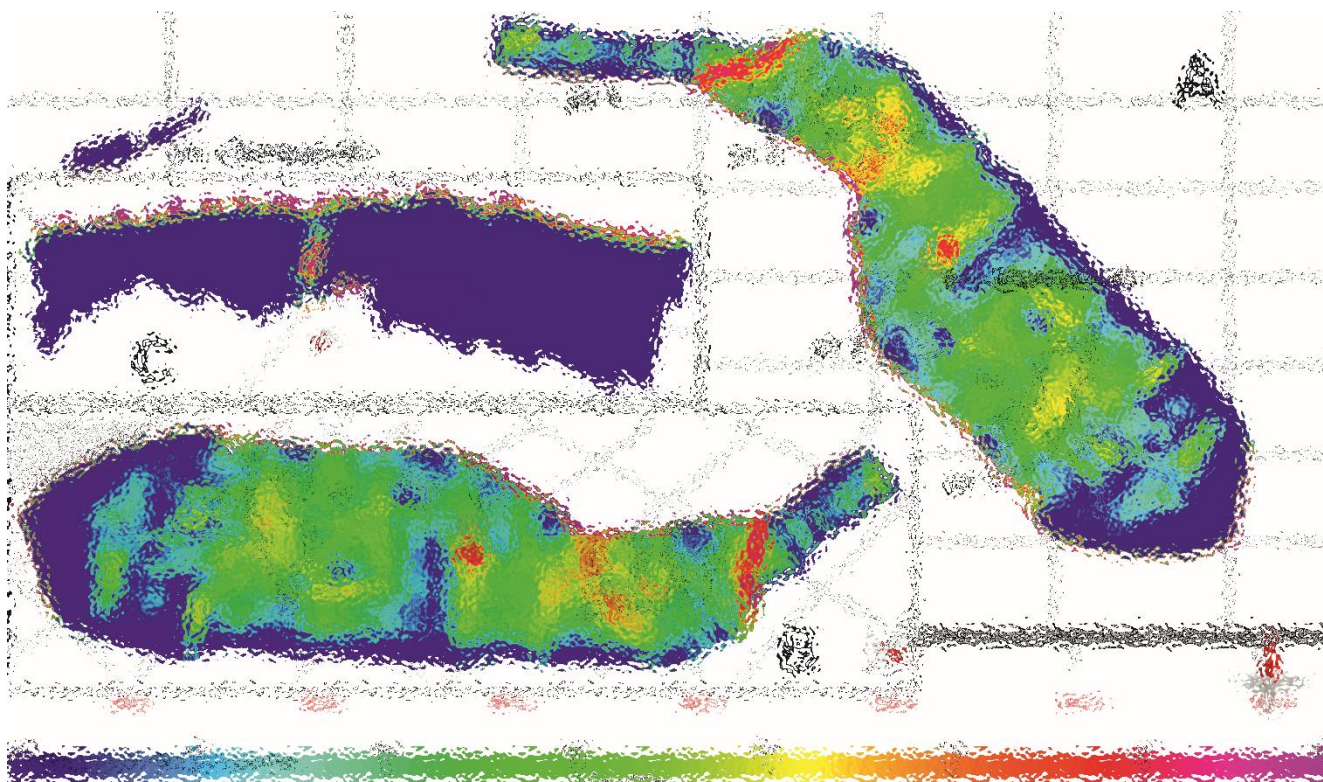


Рис. 18 Величины относительного расширяющего напряжения на поверхности подошвы разрывного нарушения при взбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – скольжение вдоль поверхности разлома, Зеленый, желтый и красный – скольжение вдоль разлома с расширением стенок. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

На схеме относительного расширяющего напряжения для подошвы наблюдаются схожие аномалии, что и для кровли, но несколько другой интенсивности. Аномалия в районе первого рудного тела стала гораздо менее яркой, тогда как у участка «Безводный» наблюдается обратная ситуация. Аномалия около третьего рудного тела сместилась в юго-восточном направлении, и теперь охватывает не более глубокую часть тела, а наиболее юго-восточную. Участок западный, как и юго-восточная часть основной зоны «Надвиговая» охвачены сжимающими напряжениями. Остальная часть надвига отличается скалывающими напряжениями.

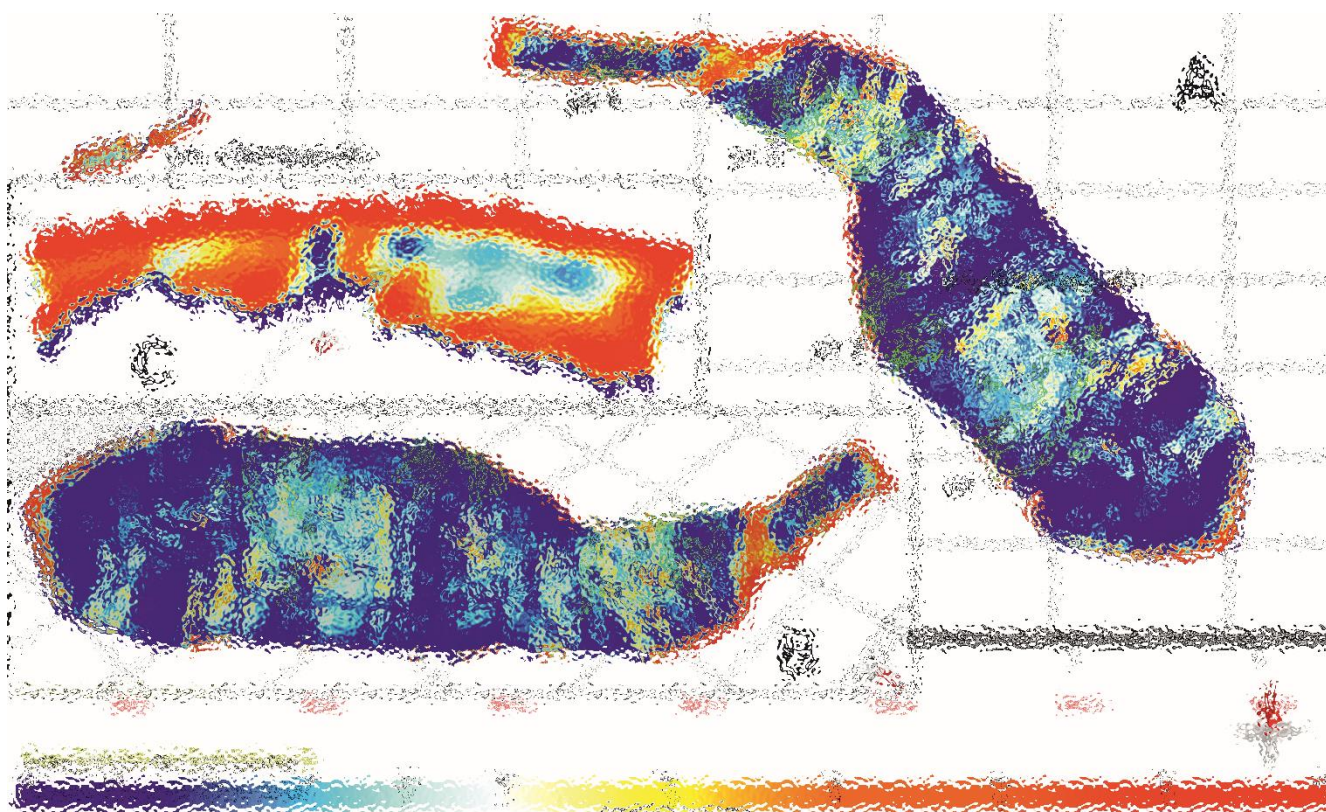


Рис. 19 Величины относительных кулоновых напряжений на поверхности подошвы разрывного нарушения при взбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий цвет – минимальные напряжения, красный – максимальные значения. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

На схеме кулонова растяжения для подошвы можно отметить, что крупные положительные аномалии находятся только в районе участка «Западный», тогда как в области остального надвига преобладают малые напряжения. Мелкие аномалии наблюдаются в районе первого, третьего рудных тел и у-ка «Безводный», по интенсивности примерно совпадающие с относительным расширяющим напряжением. Аномалия у третьего тела продолжается на глубину по падению надвига, как и на поверхности кровли. А вот аномалия у первого рудного тела, раздваивается на две ветви: аналогичную кровле с падением на север и с падением на восток, не наблюдаемом в кровле. Кроме этого наблюдается вытянутая аномалия на восток от второго рудного тела, не наблюдаемая на предыдущих схемах.

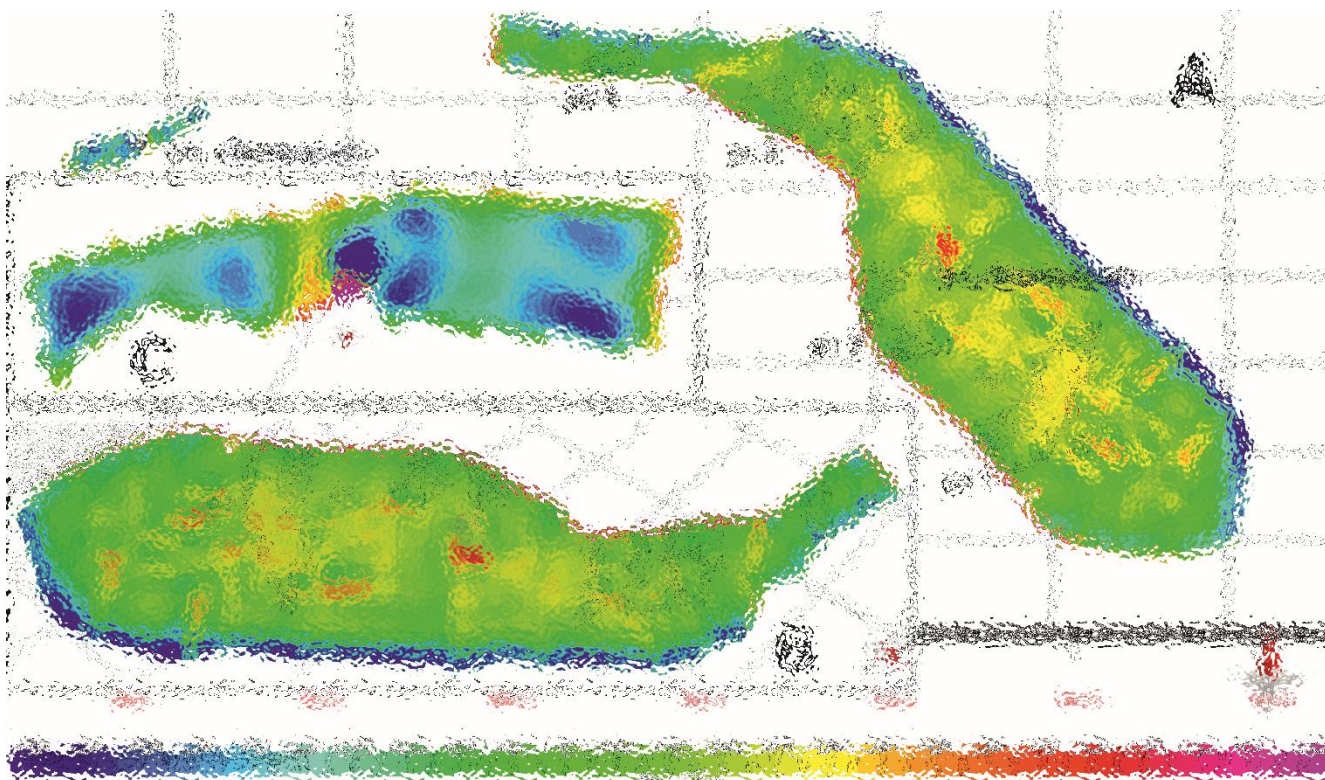


Рис. 20 Величины объемного расширения на поверхности подошвы при взрывовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – сжатие, красный и фиолетовый – растяжение. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Параметр объемное расширение для подошвы, как и для кровли, дал весьма хаотичный разброс значений. Снова имеется одна яркая положительная аномалия около у-ка «Безводный». Остальные повышенные значения почти не выходят из отрицательных значений. Однако они сконцентрированы к северу, к юго-востоку, в пределах жилы первого рудного тела и в юго-восточной части третьего рудного тела. Участок «Западный» также занимают отрицательные значения, но разной интенсивности, за исключением центрального участка с ураганными положительными значениями, что скорее всего связано с артефактом построения поверхности участка.

4.2 Сброс

4.2.1. Кровля

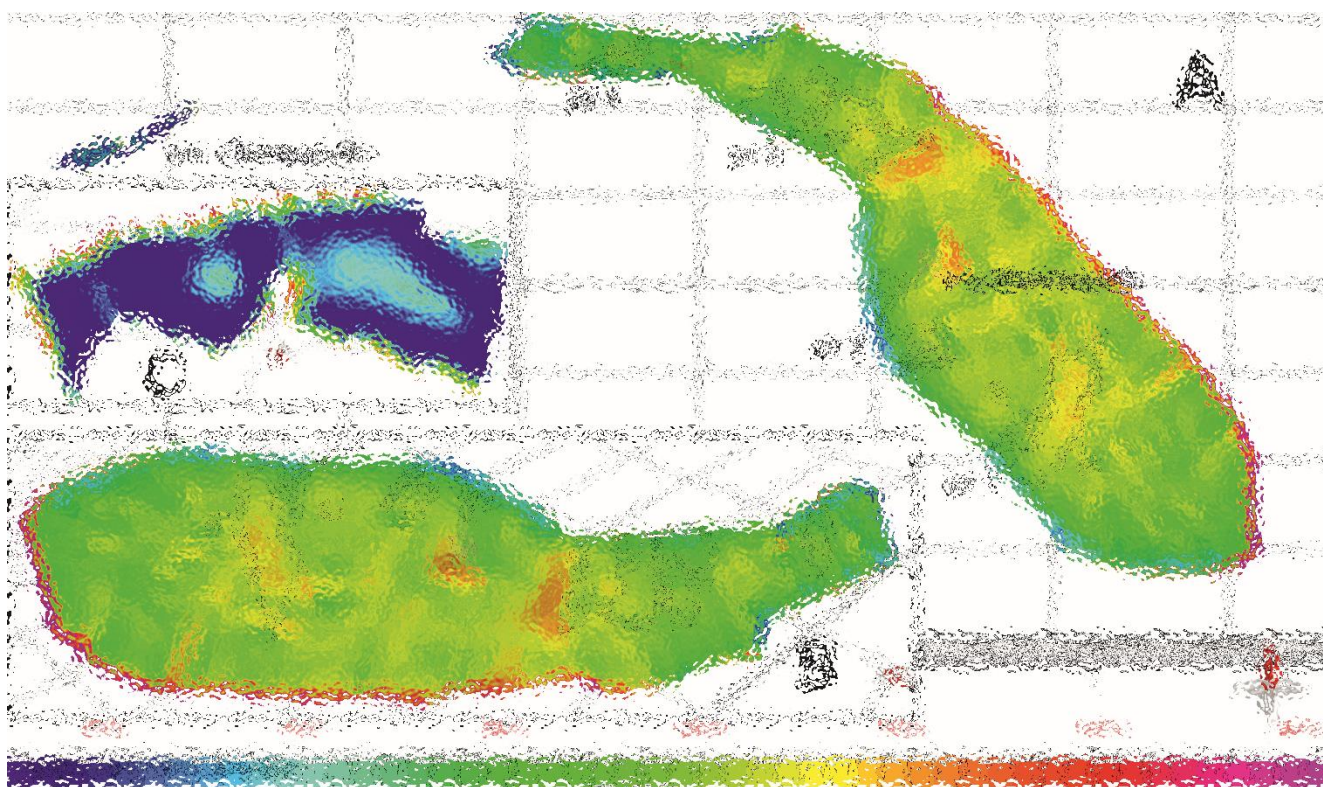


Рис. 21 Величины относительного расширяющего напряжения на поверхности кровли разрывного нарушения при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – скольжение вдоль поверхности разлома, Зеленый, желтый и красный – скольжение вдоль разлома с расширением стенок. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Схемы для сбросовой кинематики отличаются меньшей контрастностью, относительно взброса. Относительное расширяющее напряжение на поверхности кровли дало достаточно стабильное скалывающее напряжение почти на всей поверхности зоны «Надвиговая». Исключением стал участок «Западный», где преобладают сжимающие напряжения. Слабые положительные аномалии наблюдаются в районе жилы первого рудного тела, рядом с участком «Безводный» и к юго-востоку от третьего столба.

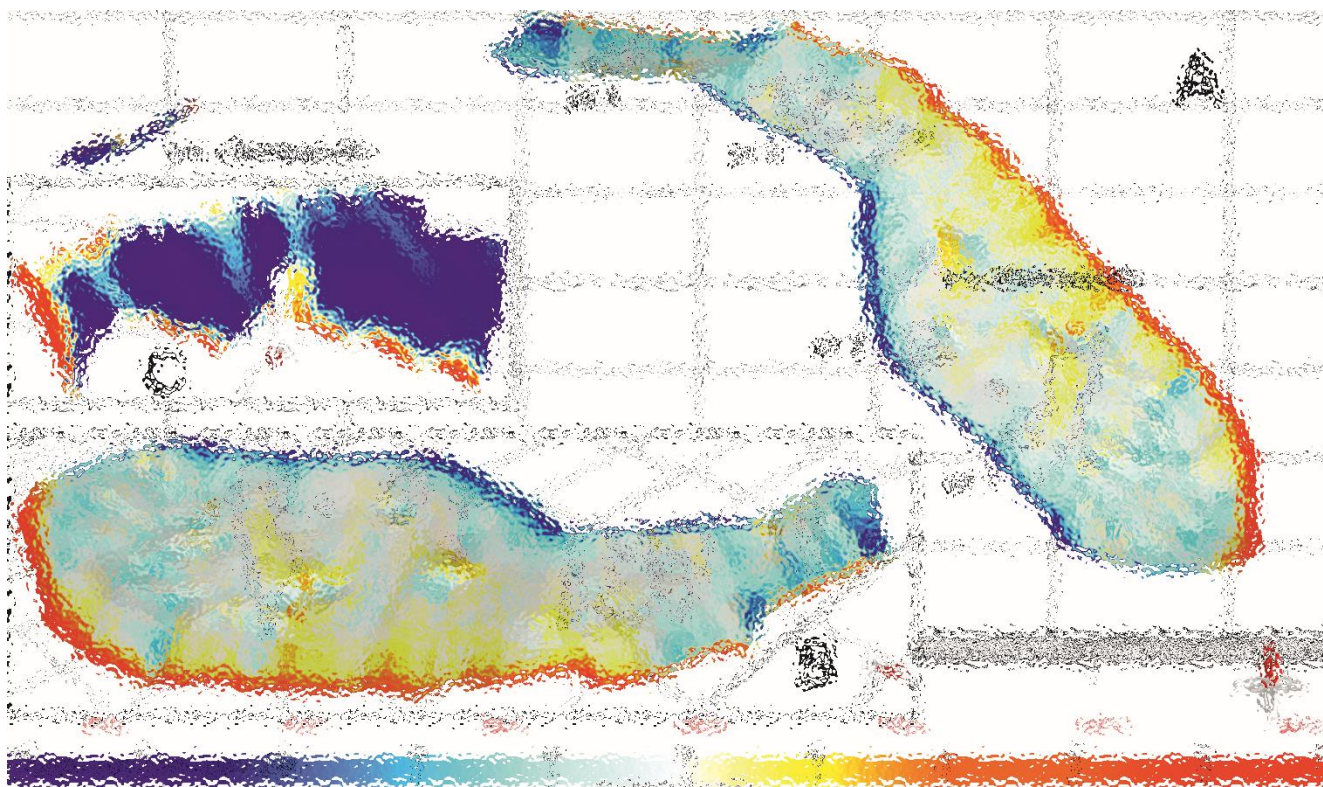


Рис. 22 Величины относительных кулоновых напряжений на поверхности кровли разрывного нарушения при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий цвет – минимальные напряжения, красный – максимальные значения. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Кулоново напряжение, как и относительное расширяющее не отличается большим разбросом значений. Снова участок «Западный» отличается отрицательными значениями от остальной зоны «Надвиговая». Незначительные положительные аномалии наблюдаются около участка «Безводный», к северу от первого рудного тела и к востоку от жилы четвертого рудного тела.

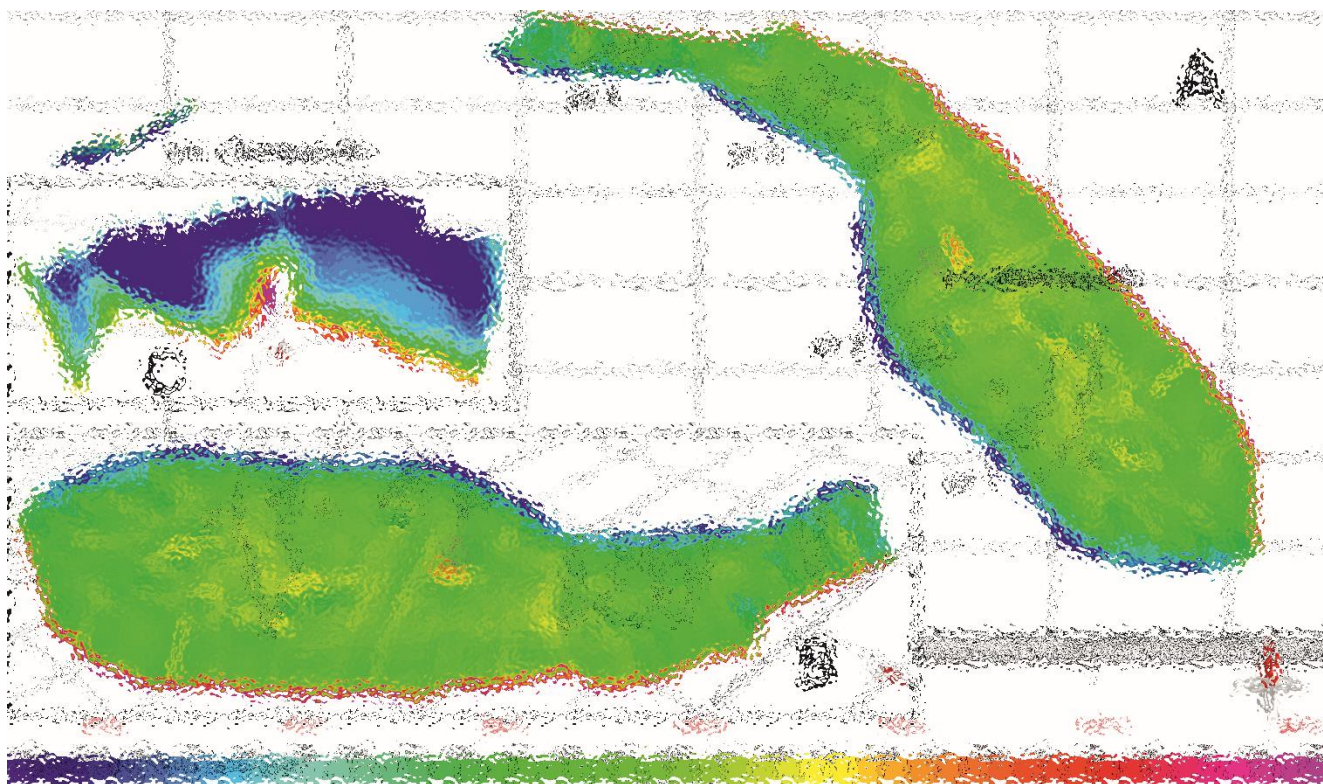


Рис. 23 Величины объемного расширения на поверхности кровли при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – сжатие, красный и фиолетовый – растяжение. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Объемное расширение снова дает отрицательную аномалию на у-ке «Западный», а на основной части зоны стабильные умеренно отрицательные значения. Исключением, как обычно, является область рядом с у-ком «Безводный».

4.2.2. Подошва

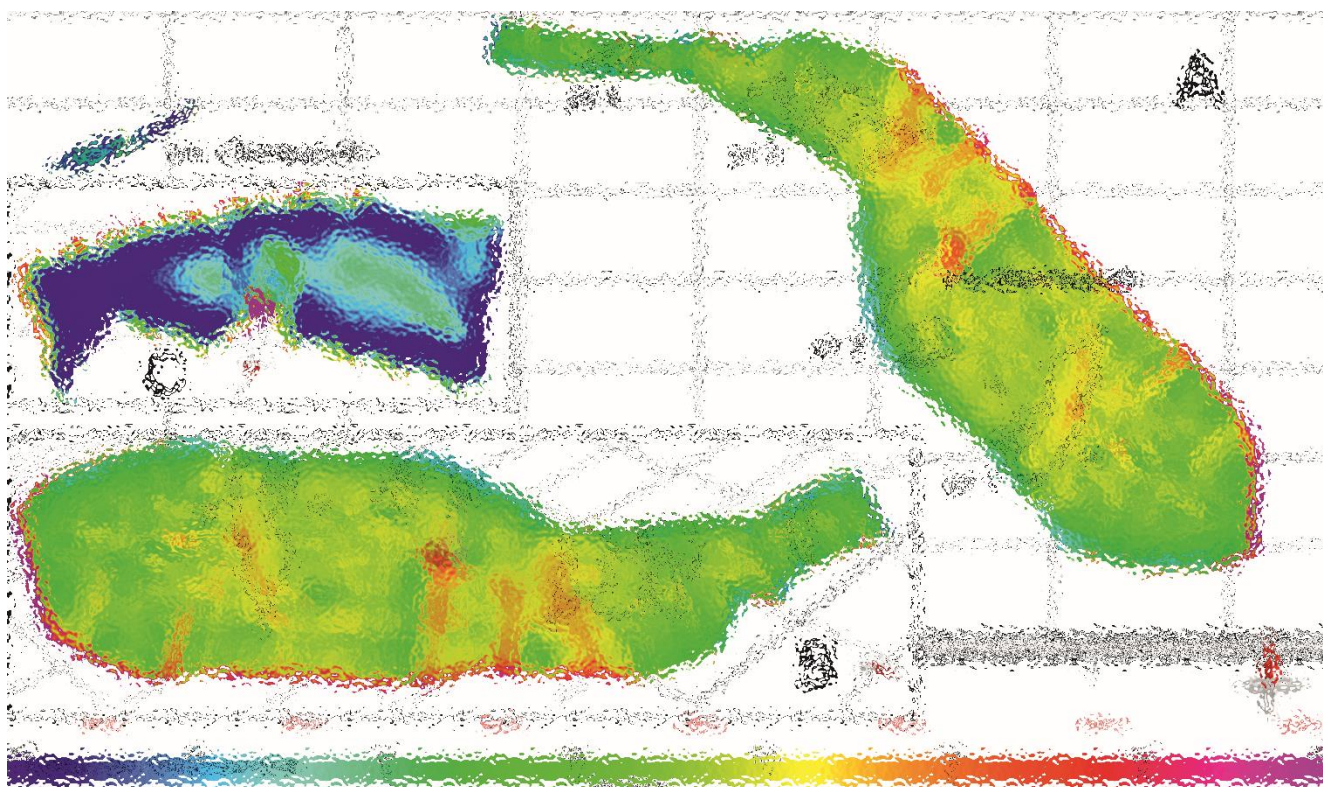


Рис. 24 Величины относительного расширяющего напряжения на поверхности подошвы разрывного нарушения при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – скольжение вдоль поверхности разлома, Зеленый, желтый и красный – скольжение вдоль разлома с расширением стенок. Контурь - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Поверхность подошвы, в отличие от кровли, обладает большим разбросом значений. Кроме сжимающих напряжений на участке «Западный», можно выделить несколько областей с расширяющим напряжением. Первая отличается не высокими значениями растягивающего напряжения, но хорошо совпадает с восточной частью жилы первого рудного тела. Вторая находится на расстоянии между третьим рудным телом и участком «Безводный» и в плане выглядит как три параллельных столба падающих по падению надвига. Отличается относительно высокими значениями растягивающего напряжения с максимумом в районе участка «Безводный».

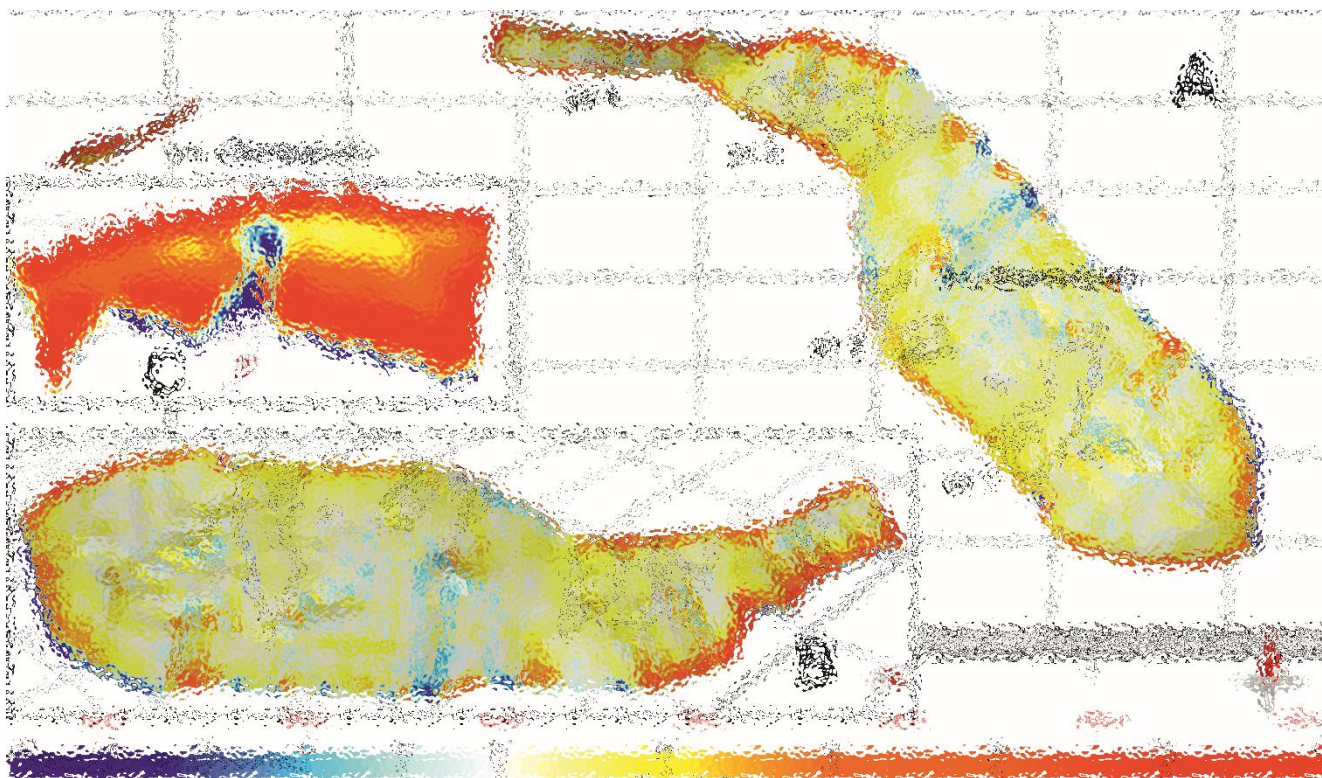


Рис. 25 Величины относительных кулоновых напряжений на поверхности полошвы разрывного нарушения при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий цвет – минимальные напряжения, красный – максимальные значения. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

Распределение кулонова напряжения для подошвы сброса отличается достаточно хаотичным разбросом значений в небольших пределах, за исключением «Западного», где наблюдается положительная аномалия. Почти вся поверхность надвига отличается чуть повышенными значениями кулонова напряжения. Впервые наблюдается значительные отличия в аномалиях от относительного расширяющего напряжения. Между третьим рудным телом и участком «Безводный» по относительному расширяющему напряжению наблюдалась расширяющая аномалия, тогда как в кулоновом напряжении наблюдается наоборот одни из не многих отрицательные напряжения.

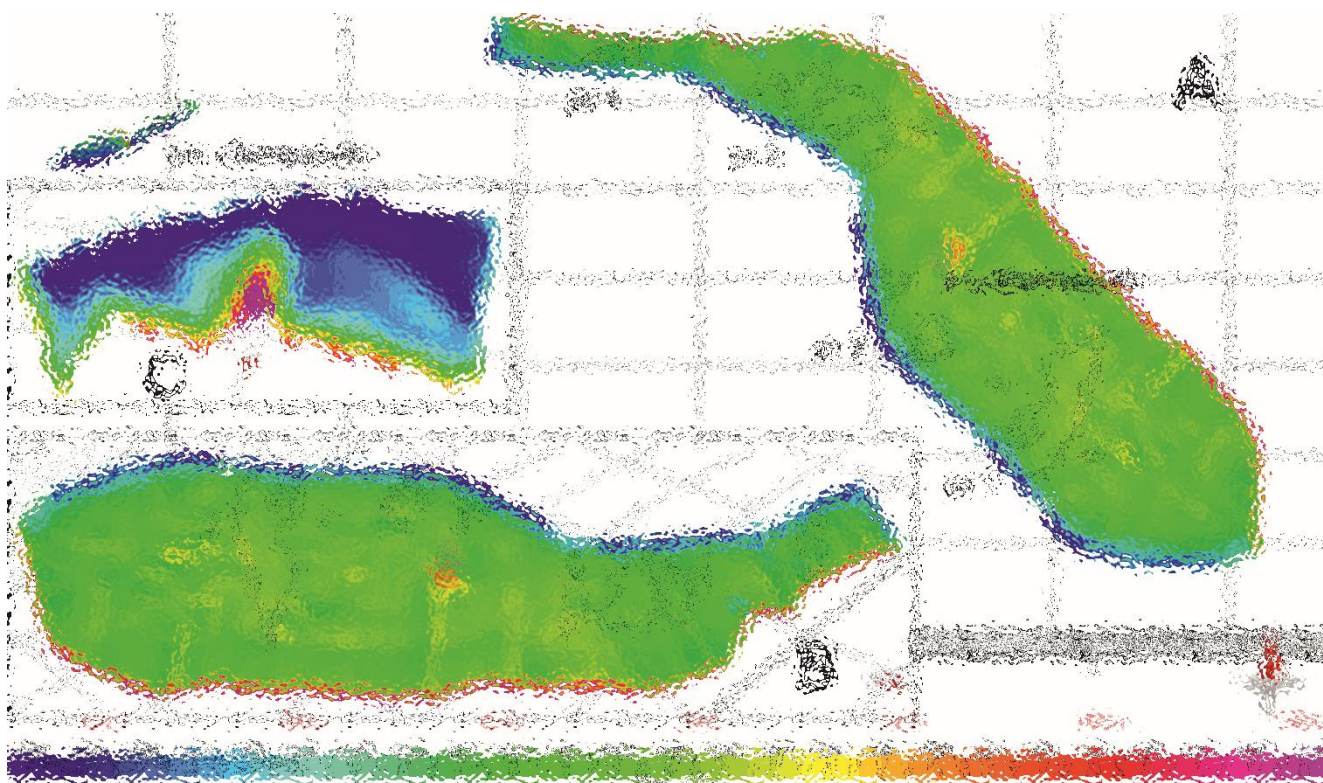


Рис. 26 Величины объемного расширения на поверхности подошва при сбросовом режиме нагружения. А – вид в плане, В - вид с северо-востока, С – вид на Западный участок с северо-запада. Синий и зеленый цвет – сжатие, красный и фиолетовый – растяжение. Контуры - участки жильно-прожилковых тел по [Неустроев, 2002].

В распределение объемного расширения по поверхности подошвы зоны «Надвиговая» снова не наблюдается ярких аномалий. Она покрыта в основном умеренными отрицательными значениями. Исключениями снова являются участки «Западный» и «Безводный», где наблюдаются яркие отрицательная и положительная аномалии соответственно.

4.3 Интерпретация результатов

Обобщив аномальные значения для каждого из параметров можно выделить несколько закономерностей.

Для взбросовой и сбросовой кинематики участок «Западный» всегда давал одни из самых ярких аномалий, что скорее всего, обусловлено слишком малой отстроеной криволинейной поверхностью разрывного нарушения, из-за чего ее почти полностью охватывают краевые аномалии.

В основной зоне «Надвиговая» для взброса наиболее часто «положительно» аномальными были области первого, третьего рудных тел и участка «Безводный». Первые два являются самыми богатыми и именно они на сегодняшний день активно разрабатываются. В случае сброса, в основной части зоны часто аномалии встречались только на участке «Безводный», рудные тела выделялись незначительно.

Исходя из этих результатов, можно отметить, что лучше отражает полезную минерализацию взбросовая кинематика. Так как лишь при ней, по параметрам относительного расширяющего напряжения и кулонова напряжения получилось скоррелировать полезную минерализацию первого и третьего рудных тел и тектонофизические критерии. Так же из этого можно положить, что взбросовый тектонический этап с большей вероятностью был рудоносным.

Если говорить о прогнозе оруденения на глубокие горизонты, то прогноз можно сделать для продолжения жил первого и третьего рудных тел. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для разных тел получается одно направление продолжения аномалий, несмотря на то, что азимут падения зоны «Надвиговая» меняется. Для первого и третьего рудных тел, по данным тектонофизических расчетов получается прогноз на северо-восток. Тогда как третье рудное тело падает в плоскости надвига тоже на северо-восток, а первое на северо-восток-восток.

При экстраполяции поверхности разлома на глубину с учетом геологических (как в данной работе) или геофизических данных, можно спрогнозировать участки с высокими величинами относительного расширяющего давления и кулоновых напряжений, имеющих пространственную ориентировку, аналогичную выявленным на высоких горизонтах поверхности разлома.

Выводы

В рамках данной работы были составлены литолого-структурный план Бадранского рудного поля, в первую очередь по данным Геологического центра СПбГУ, а потом по данным предшественников. Составлены лито-стратиграфическая колонка к плану и два разреза. Была выявлена приуроченность полезной минерализации, помимо поверхности надвига, литологически к нижней толще, а структурно к ядрам складок.

Также были выполнены тектонофизические расчеты напряженных параметров для поверхностей кровли и подошвы зоны «Надвиговая» для взбросовой и сбросовой кинематики. Были рассмотрены три параметра: относительное расширяющее давление, кулоново напряжение и объемное расширение. Во время корреляции известных жил и аномальных значений тектонофизических параметров было выделено несколько закономерностей:

- Наиболее достоверными оказались параметры относительное расширяющее давление и кулоново скалывающее напряжение
- Лучше всего коррелируются жилы первого и третьего рудных тел, кроме того обладающие наибольшей концентрацией полезного компонента, также выделяется участок «Безводный»
- Взбросовая кинематика также коррелируется лучше, нежели сбросовая.
- Прогноз оруденения на глубокие горизонты для первого и третьего рудных тел получился в одинаковом направлении – на северо-восток.

Подводя итог можно сказать, что тектонофизические параметры позволили «продлить» золотое оруденение на глубину, но не для всех рудных тел (только первое и третье рудное тело) и в случае аналогичной ориентировки разрывного нарушения можно ожидать полезную минерализацию и на более глубоких горизонтах.

Автор благодарит сотрудников ЗАО «ГРК «Западная»: директора по геологии А.В. Верховизина, главного геолога Ю.И. Смолинова, геологов Копытова М. Ф., Белуженко Е.В., Круглова А.А., Гиль А. Г., Колесникова А. А. и Бабичева И. В. за возможность проведения исследований, помощь в полевых работах и ценные замечания. А также своего научного руководителя В. Н. Войтенко за неоценимую методическую помощь и возможность поработать на данном объекте.

Литература

Монографии:

1. Гончаров М. А., Талицкий В. Г., Фролова Н. С. Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005, - 496 с.
2. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Под ред. Г.С. Шапиро. в 2-х томах. — Москва: Иностранная литература, 1954. - 647 с.
3. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. Научное издание. -М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 406 с.

Статьи:

1. Войтенко В.Н., Задорожный Д.Н. Анализ палеонапряжений по ориентировке трещин растяжения построением круговых диаграмм Мора (на примере жильно-прожилковых тел месторождения Базовское, Восточная Якутия) // Материалы Четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. М. 2015. Т. 1. С. 42-51
2. Baer G., Beyth M., Reches Z.. Dikes emplaced into fractured basement, Timna Igneous Complex, Israel. J. Geophys. Res. 1994. № 99. P.24039-24051.
3. Lin J., Stein R.S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, Journal of Geophysical Research, 2004, v. 109.
4. McIlroy D., Garton D. Realistic interpretation of ichnofabrics and palaeoecology of the pipe-rock biotope, 2009
5. N. Moore, A. Eugene. Depositional Environments of Lower Paleozoic Rocks in the White Inyo Mountains, 1976
6. Toda S., Stein R. S., Richards-Dinger K., Bozkurt S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer // Journal of Geophysical Research, 2005, v. 110.

Фондовые материалы:

1. Ахъяев М. Р., Аметов Р. С. Отчет о поисковых работах м-ба 1:25000 в пределах Бадранского рудного узла (Бадранский поисковый отряд) за 1975 г. пос. Усть-Нера, 1975, 101с.
2. Неустроев Р. Г. Структурно-морфологические особенности размещения золоторудного оруднения месторождения Бадран :Северо-восток Якутии.- дисс. к.г.-м.н., Якутск, 2004.- 149 с.
3. Тютрин В. Р., Егорова Л. И., Ефимов В. В. 2002 Отчет о результатах поисковых работ в пределах Бадранского рудного узла за 1996-2001 г.г. (Бадранская партия). п. Хандыга, 2002, 558 с.

4. Фридовский В. Ю. Структуры месторождений золота Верхояно-Колымской орогенной области.- дисс. д.г.-м.н., Якутск, 1999.- 408 с.
5. Яловик Г. А. Геолого-структурные и вещественные особенности золоторудных месторождений в шарьяжно-надвиговых структурах Яно-Колымского и Монголо-охотского орогенных поясов (на примере Бадранского, Карийского и Пильненского месторождений).- дисс. к.г.-м.н., Новосибирск, 2016.- 161 с.